



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DE UM EMISSOR DE RAIO X PORTÁTIL

Alison Gregório de Souza

Campo Grande MS
25 de fevereiro de 2022



FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

ENGENHARIA ELÉTRICA

SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DE UM EMISSOR DE RAIOS X PORTÁTIL

Alison Gregório de Souza

Orientador: Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e
Geografia, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro (a)
Eletricista.

Campo Grande MS
25 de fevereiro de 2022

SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DE UM EMISSOR DE RAO X PORTÁTIL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara
Orientador

Prof. Dr. Jurandir de Oliveira Soares

Prof. Dr. Raymundo Cordero Garcia

Campo Grande MS
25 de fevereiro de 2022

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Alison Gregório de Souza, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.307.050 e CPF nº 069.183.211-02, declaro que o “Trabalho de Conclusão de Curso” apresentado, com o título “Simulação e Dimensionamento do Circuito de Potência de um Emissor de Raio x Portátil” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 25 de fevereiro de 2022.

Alison Gregório de Souza

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço primeiramente a Deus por tudo que Ele tem proporcionado em minha vida, por ter me concedido o conhecimento necessário para concluir este trabalho, e principalmente ter me guiado à um curso tão incrível, ao qual eu pude me identificar tanto e gostado cada vez mais ao longo de cada matéria apresentada.

Agradeço também a minha família pelo incentivo e auxílio durante todo tempo, proporcionando o suporte necessário durante o curso.

Agradeço à cada professor, pela dedicação e pelo conhecimento passado em todas as suas aulas, onde por meio de cada experiência proporcionada por cada um deles, me possibilitou a oportunidade de crescer e aprender cada vez mais.

Agradeço em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara, pela orientação e ajuda ao longo do TCC. Sou grato pelas ideias sugeridas, pelo suporte, paciência e pelo apoio em cada etapa desse processo.

Agradeço também à cada colega da turma, que tive a felicidade de conhecer e conviver ao longo do curso. Foi enriquecedor a oportunidade de fazer trabalhos em grupo, estudar juntos e adquirir experiências únicas.

De um modo geral, agradeço a todos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional durante todo o processo, desde o primeiro ano de curso até o término. Foram as experiências e conhecimentos adquiridos durante todo o curso, com cada pessoa, que me possibilitou escolher o tema deste trabalho, e concluir o curso.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é apresentar a fase inicial do projeto de um emissor de Raio X portátil que compreende o circuito de alimentação do tubo emissor de Raio X. Primeiramente, foi feito um estudo de diversas bibliografias em conjunto com análise do esquema elétrico de um equipamento comercial modelo SONTU60. Após um estudo aprofundado, foi levantado um circuito elétrico dividido em estágios, que foi posteriormente simulado em ambiente SIMULINK/MATLAB com o intuito de observar a resposta de funcionamento do circuito. Adicionalmente, foi realizado um dimensionamento prévio de alguns dos componentes desse circuito, a fim de avaliar a possibilidade de implementação a partir do levantamento de custos e disponibilidade de componentes. O maior desafio neste tipo de equipamento se trata da necessidade de isolamento elétrica por conta do elevado nível de tensão. Dentre os subcircuitos que compõe um emissor de Raio X, o foco principal deste trabalho está na utilização da eletrônica de potência para geração de tensão na ordem de kV (quilo volts). Para tanto, os estágios de conversão foram analisados separadamente e os resultados mostram que o circuito dimensionado foi capaz de entregar o nível de tensão requerido para o funcionamento.

Palavras-Chave: Raio X, Emissor de raio X, eletrônica de potência

ABSTRACT

The objective of this work is to present an initial phase of the project of a portable X-Ray emitter that comprises the power source of the X-Ray emitter tube. First, a study of several bibliographies was carried out together with an analysis of the electrical diagram of the commercial equipment SONTU60. After an in-depth study, an electrical circuit divided into stages was elaborated, which was later simulated in SIMULINK/MATLAB with the aim of observing the circuit's operating response. Additionally, a previous dimensioning of some of the components of this circuit was carried out, in order to evaluate the possibility of implementation based on the cost assessment and availability of components. The biggest challenge in this type of equipment is the need for electrical insulation due to the high voltage levels. Among the subcircuits of an X-Ray emitter, the main focus of this work is the use of power electronics to generate voltage in the order of kV (kilovolts). For this purpose, the conversion stages were analyzed separately and the results show that the dimensioned circuit was able to generate the voltage level required for its operation.

Keywords: X-ray, X-ray emitter, power electronics

LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Figura 2.1	Resultado do uso da radiação X no tratamento da epilação15
Figura 2.2	Equipamento de Raio X produzido pela XRAD17
Figura 2.3	Circuito simplificado de um emissor de Raio X de grande porte.....17
Figura 2.4	Comando do emissor da XRAD18
Figura 2.5	Emissor portátil Porta 100, da JOB.....19
Figura 2.6	Emissor portátil SONTU6019
Figura 2.7	Circuito simplificado de um emissor de Raio X portátil20
Figura 2.8	Relação da tensão no primário do transformador, tensão na ampola e corrente na ampola21
Figura 2.9	Circuito do filamento simplificado22
Figura 2.10	Visão interna de uma ampola de Raio X.....23
Figura 2.11	Localização do medidor de corrente23
Figura 2.12	Capa focalizadora24
Figura 2.13	Anodo do tubo de Raio X24
Figura 2.14	Corrente do tubo em função da corrente do filamento.....25
Figura 2.15	Saturação da corrente no tubo25
Figura 2.16	Etapas do disparador de Raio X.....26
Figura 2.17	Anodo do tubo de Raio X27
Figura 2.18	Conversor CA-CC.....27
Figura 2.19	Forma de onda retificada e filtrada28
Figura 2.20	Circuito do inversor de onda completa29
Figura 3.1	Circuito retificador de onda completa.....32

Figura 3.2	Banco de capacitores projetado.....	33
Figura 3.3	Banco de capacitores do emissor portátil Sontu60	33
Figura 3.4	Inversor projetado.....	35
Figura 3.5	Circuito do PWM de chaveamento do inversor.....	35
Figura 3.6	Saída do transformador de alta tensão do Sontu60	37
Figura 4.1	Corrente do filamento (Eixo Y) em Ampères, em função da tensão do filamento (Eixo X), em Volts.....	39
Figura 4.2	Corrente do anodo (Eixo Y), em Ampères em função da tensão do filamento (Eixo X), em Volts.....	39
Figura 4.3	Gráficos da corrente no anodo e corrente no filamento em função da tensão no filamento, do emissor portátil JADE.....	40
Figura 4.4	Circuito de simulação completo.....	41
Figura 4.5	Tensão da entrada de energia, $t [s] \times V [V]$	42
Figura 4.6	Tensão retificada e filtrada por um filtro capacitivo, $t [s] \times V [V]$	43
Figura 4.7	Tensão após o estágio inversor e filtro LC, $t [s] \times V [V]$	43
Figura 4.8	Tensão após o estágio inversor e filtro LC, com mais detalhes, $t [s] \times V [V]$...	44
Figura 4.9	Disparador do emissor de Raio X	44
Figura 4.10	Tensão na saída do transformador.....	45
Figura 4.11	Tensão no capacitor de alta tensão, $t [s] \times V [V]$	46
Figura 4.12	Tensão no capacitor de alta tensão com destaque no carregamento do mesmo, $t [s] \times V [V]$	46
Figura 4.13	Tensão no tubo de Raio X, $t [s] \times V [V]$	47
Figura 4.14	Tensões no circuito de potência, $t [s] \times V [V]$	48
Figura 4.15	Corrente medida na entrada da ampola	49
Figura 4.16	Corrente medida no centro do secundário do transformador	49
Figura 4.17	Corrente medida no diodo do retificador (BT).....	50

Figura 4.18	Tensão medida no retificador (BT)	51
Figura 4.19	Corrente medida na chave do inversor	51
Figura 4.20	Tensão medida na chave do inversor	52
Figura 4.21	Corrente medida no diodo do retificador (AT)	52
Figura 4.22	Tensão medida no diodo do retificado (AT)	53
Figura 7.1	Retificador de onda completa no MatlabSimulink	58
Figura 7.2	Filtro capacitivo de baixa tensão no Matlab/Simulink	58
Figura 7.3	Circuito inversor no Matlab/Simulink	59
Figura 7.4	Filtro LC no Matlab/Simulink	59
Figura 7.5	Retificador de onda completa (alta tensão) no Matlab/Simulink	60
Figura 7.6	Filtro capacitivo no Matlab/Simulink	60
Figura 7.7	Ampola de Raio X no Matlab/Simulink	61
Figura 7.8	Circuito de filamento no Matlab/Simulink	61
Figura 7.9	Sinais de entrada do disparador	62
Figura 7.10	Sinais de entrada de corrente e tensão	62

Lista de Tabelas

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Tabela 2.1	Semicondutores usados para diferentes frequências20
Tabela 3.1	Capacitância para diferentes <i>ripples</i> de tensão32
Tabela 3.2	Capacitância para diferentes <i>ripples</i> de tensão para filtro de alta tensão .34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
1.2. Organização do Trabalho.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Emissor de Raio X.....	15
2.1.1. Os conceitos físicos associados aos emissores de raios X.....	16
2.1.2. Tipos de emissores e aspectos gerais	16
2.1.3. Tensão e corrente da ampola	21
2.1.4. Controle do tempo de exposição.....	26
2.2. Conversor CA-CC com filtro capacitivo.....	27
2.3. Conversor CC/CA com filtro LC	29
3. Metodologia e Desenvolvimento	31
3.1. Fonte de kv	31
3.1.1. Dimensionamento do conversor CA-CC com filtro capacitivo.....	31
3.1.2. Dimensionamento do conversor CC-CA com filtro LC	34
3.1.3. Dimensionamento do transformador.....	36
3.2. Controle de corrente (mA).....	37
4. Resultados	38
4.1. Tensão no filamento, corrente no filamento e corrente no anodo	38
4.2. Resultado da simulação da fonte de tensão kv	40
5. Conclusões Gerais	54
6. Referências	56
7. Apêndice A-Modelos de Simulação	58

1. INTRODUÇÃO

Através dos anos o ser humano vem buscando evoluir e aprimorar as ciências envolvidas nas mais diversas áreas do conhecimento, especialmente quando se trata da área da saúde, onde os conhecimentos e tecnologias costumam evoluir rapidamente dada a necessidade da melhoria de qualidade de vida da população mundial. Uma área da saúde que é bastante relevante é a radiologia, que torna possível o diagnóstico de diversas doenças por meio de equipamentos que utilizam a emissão de ondas de Raio X.

O equipamento responsável por emitir o Raio X é chamado de emissor de Raio X, através do qual é possível variar dois parâmetros importantes que irão determinar a qualidade de uma imagem: corrente vs. tempo de exposição, também chamado de técnica, e tensão em kV, também chamado de profundidade. Ao controlar esses parâmetros, é possível realizar a emissão de Raio X da forma desejada, dependendo de qual parte do corpo será submetida ao exame.

O objetivo desse trabalho é apresentar a fase inicial do projeto de um emissor de Raio X portátil, e portanto, tem como foco o alimentador de alta tensão da ampola. Após consultas na literatura e análise de um equipamento comercial, a topologia do circuito foi definida e simulada em um modelo computacional desenvolvido em SIMULINK/MATLAB. Conforme os resultados da simulação, foram selecionados os componentes existentes no mercado para que o circuito dimensionado fosse o mais próximo do real.

No mercado especializado, principalmente no Brasil, não são encontrados muitos fabricantes de emissores do tipo utilizado neste trabalho, e os poucos que se encontram, comercializam emissores de grande porte. Atualmente, as vantagens de se utilizar um emissor de raios X superam de longe os riscos da utilização de altos níveis de radiação, que hoje são conhecidos e completamente controlados por normas reguladoras.

Conforme citado, os emissores de grande porte são produzidos com mais frequência do que os emissores portáteis, devido ao fato de sua fabricação ser facilitada. Porém, um emissor portátil tem muito mais vantagens do que o emissor de grande porte, como por exemplo, a facilidade de manuseio, seu peso e tamanho reduzidos e as diversas formas de controle e segurança que não estão presentes em um emissor de grande porte.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O estudo tem como objetivo realizar a simulação do circuito de potência de alimentação do tubo de Raio X, como uma etapa basilar para o projeto de um emissor de Raio X completo.

1.1.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se mencionar:

- O levantamento de materiais para pesquisa sobre o emissor de raio X afim de entender de forma geral o seu funcionamento.
- Separação do circuito geral em partes além da compreensão de cada etapa que o compõe.
- Montagem de um modelo de simulação em MATLAB/ SIMULINK.
- Dimensionamento dos componentes eletrônicos para a implementação de um protótipo.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada uma revisão bibliográfica básica com o intuito de situar o trabalho no contexto geral. Além disso, é apresentada a motivação para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica de funcionamento do equipamento, seguida por detalhes dos circuitos envolvidos e da simulação realizada.

No Capítulo 3 são apresentados resultados de simulação para o circuito proposto.

No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

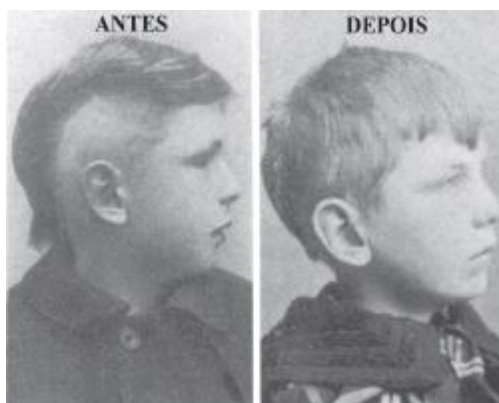
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. EMISSOR DE RAIOS X

Ainda que existam vários modelos de emissores de Raios X no mercado, sabe-se que existiu um longo caminho para o amadurecimento da tecnologia utilizada atualmente. A descoberta da radiação X data, precisamente, de 8 de novembro de 1895, sendo descoberta pelo cientista Wilhelm Conrad Roentgen, na Alemanha [6]. Em pouco tempo, a mesma foi usada para aplicações médicas de várias formas.

Uma das aplicações iniciais foi a epilação da face, isso até meados do século XX [3], onde ainda eram desconhecidos os riscos da radiação. Outra aplicação utilizada foi no ano de 1904, para tratamento de Capitis, uma micose no couro cabeludo [6], conforme é mostrado na Figura 2.1. Ainda naquela época não havia nenhuma blindagem para emissão de Raios X.

Figura 2.1 Resultado do uso da radiação X no tratamento da epilação



Fonte: Princípios de Física em Radiodiagnóstico, 2008

Os efeitos da radiação foram constatados no ano seguinte à descoberta, em 1897 [6], e com a comprovação desses efeitos, os cientistas buscaram uma forma de diminuir os níveis de radiação e ainda assim aumentar a qualidade da imagem gerada.

No ano de 1910, houve uma diminuição nos relatos dos efeitos de raios X, isso, graças ao tubo de Coolidge e do transformador de Snook. Porém, anos mais tarde, foi descoberto que radiologistas começaram a ter problemas sanguíneos, tais como anemia e leucemia, de forma mais frequente [3]. Dessa forma, quem trabalhava frequentemente com o emissor, passou a usar equipamentos de proteção individual como forma de prevenções aos efeitos da radiação.

2.1.1. Os conceitos físicos associados aos emissores de raios X

Sabe-se da Física que a unidade de carga elétrica é o Coulomb (C), onde a unidade equivale a carga de 6×10^{18} elétrons [1]. Logo, pela equação 1, tem-se que a carga (Q) de 1 elétron vale $1,6 \times 10^{-19}C$.

$$\frac{1C}{6 \times 10^{18}} = 1,6 \times 10^{-19}C \quad (1)$$

A corrente elétrica (I) é definida como a quantidade de carga que flui em determinado material por segundo (Coulomb/segundo), conforme equação 2. Sua unidade de medida é Coulomb/segundo (C/s), ou de forma mais frequente, dada em Amperes (A).

$$I = \frac{Q}{t} [A] \quad (2)$$

O Roentgen é definido como a intensidade de radiação necessária para produzir ionização e carga de $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb por quilogramas de ar. A quantidade de radiação é definida como o número de raios X ou a intensidade do feixe, sendo expressa em miliroentgens (mR) ou miliroentgens/miliampere-segundos (mR/mAs) [3]. A qualidade da radiação é definida como penetrabilidade do feixe de raios X, sendo expressa em quilovolt-pico (kVp). [3]

Logo, para se ter uma boa qualidade de imagem, é necessário selecionar 2 parâmetros que dependem da parte do corpo a ser diagnosticada, sendo:

- mAs, que representa o produto da corrente do anodo com o tempo de exposição. Sabendo que mA é coulomb por segundo, então, mAs representa o número de elétrons que será lançado do catodo ao anodo. Esse valor depende da magnitude da corrente e do tempo que essa corrente ficará ativa, também chamado de tempo de exposição.
- kV, que representa o nível de tensão aplicada ao todo emissor, definindo, tem termos práticos, a profundidade da imagem gerada.

2.1.2. Tipos de emissores e aspectos gerais

Para um melhor entendimento, será feito o estudo primeiramente de um emissor mais robusto, que já não é tão sofisticado. Em seguida, será analisado um emissor portátil. Um exemplo do emissor mais robusto é o equipamento produzido pela empresa XRAD, mostrado na Figura 2.2. Este equipamento é dividido em 3 partes: comando, gerador e ampola. O comando é onde o operador define os valores de corrente vezes o tempo, em mAs, e de tensão, em kV, conforme a parte do corpo se fazer o exame. O gerador é responsável principalmente pela transformação de baixa tensão para alta tensão e retificada. Já a ampola é onde fica o tubo de raio X que recebe a tensão em kV e corrente em mA, é também por onde é emitido o raio x.

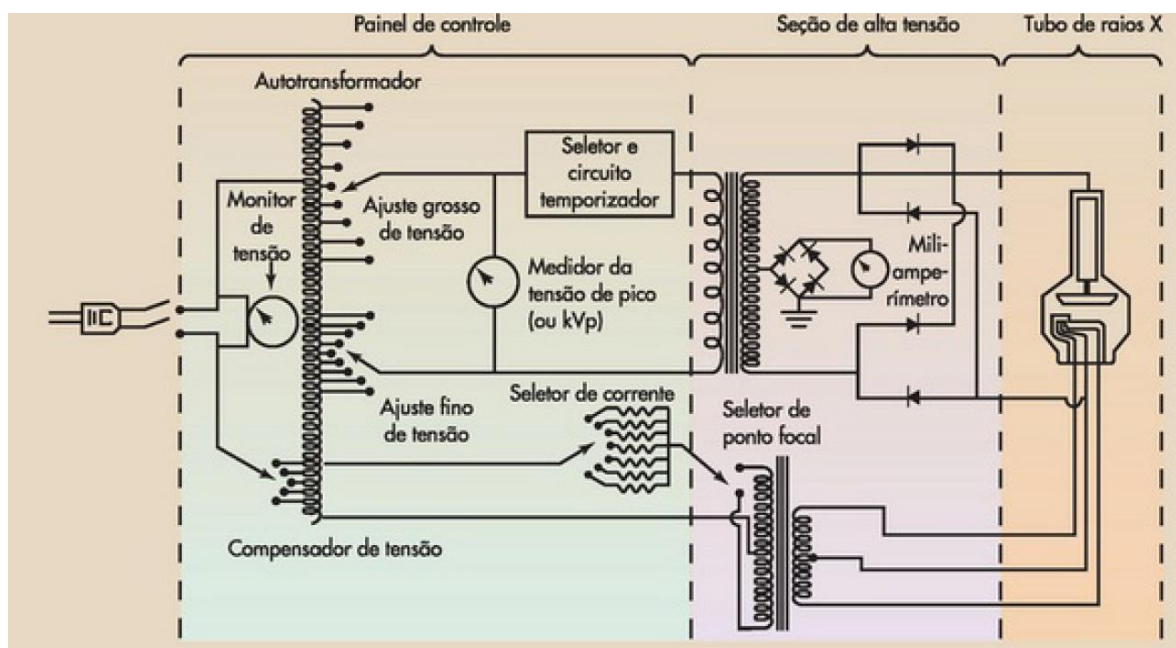
Figura 2.2 Equipamento de Raio X produzido pela XRAD



Fonte: disponível em: <http://www.xrad.com.br/veterinario-vet500-300.html>

Para o equipamento da XRAD, segundo informações do fabricante, a faixa de kV a ser selecionada é de 40 a 120kV, com capacidade de corrente de até 600mA. O circuito simplificado das três partes de um emissor de raio X mais robusto é mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 Circuito simplificado de um emissor de Raio X de grande porte



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

De acordo com a Figura 2.3, o equipamento, que é alimentado pela tensão da rede, possui um estágio de monitoramento de nível de tensão, responsável por acionar, caso necessário, o compensador de tensão na entrada de um autotransformador. Já na saída do autotransformador, existem dois conjuntos de *taps*, sendo um responsável pelo ajuste grosso da tensão e o outro é pelo ajuste mais fino. Após o ajuste de tensão, o esquema segue com um transformador elevador, cujo nível no secundário pode chegar a 90 kV. Em seguida, essa tensão é retificada e aplicada à ampola.

Logo, como é possível observar, a frequência da tensão ao longo do circuito desse emissor não muda, mantendo-se em 60 Hz. Além disso, a tensão aplicada à ampola, ainda que seja somente positiva, varia da tensão de pico a zero, o que causa um elevado *ripple* de tensão.

Já no circuito do filamento (Fig. 2.3 parte inferior), o secundário do autotransformador apresenta uma tensão em torno de 150 V, a partir de uma entrada de 240 V. Essa tensão passa por um seletor de corrente formado por vários resistores, cuja função é controlar a tensão de entrada do transformador de filamento, que vem na sequência do circuito.

A corrente que circula pelo filamento, localizado na saída do transformador, controla a quantidade de elétrons que serão lançados pelo tubo. Portanto, o seletor de corrente varia as tensões do primário e secundário, causando uma variação na corrente e temperatura do filamento, variando assim a corrente da ampola. Na Figura 2.4 é possível ver o comando deste tipo de emissor.

Figura 2.4 Comando do emissor da XRAD



Fonte: disponível em: <http://www.xrad.com.br/simulador.html>

Alternativamente ao emissor apresentado na Figura 2.2, tem-se o emissor portátil, que é o foco principal deste trabalho. Um exemplo desse tipo de emissor, mostrado na Figura 2.5, é o Porta 100, produzido pela Job do Brasil.

Figura 2.5 Emissor portátil Porta 100, da JOB



Fonte: disponível em: <https://jobdobrasil.com.br/nossos-produtos/>

A faixa de tensão do Porta 100 da JOB, segundo informações do fabricante, é de 68 a 100 kV, com corrente de até 20 mA. O emissor que será utilizado para a análise e comparação dos circuitos, neste trabalho, é o modelo Sontu60, mostrado na Figura 2.6.

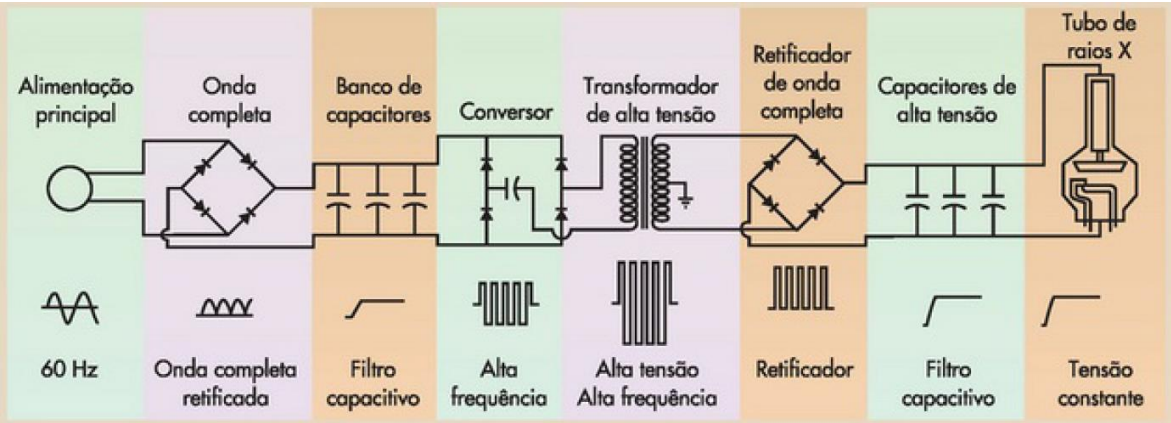
Figura 2.6 Emissor portátil SONTU60



Fonte: O autor

O circuito simplificado do emissor portátil que será a base para o estudo em tela é mostrado na Figura 2.7

Figura 2.7 Circuito simplificado de um emissor de Raio X portátil



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

Uma análise da Figura 2.7 revela uma grande diferença em relação ao circuito do emissor de grande porte mostrado na Figura 2.3. Para esse circuito vê-se que, inicialmente, a tensão da rede é aplicada a um retificador de onda completa, que é seguido por um filtro capacitivo, tornando a tensão contínua (CC), com *ripple* de tensão bem baixo.

Essa tensão CC é aplicada a um inversor, também chamado de conversor CC-CA, responsável por transformá-la em uma tensão de forma de onda alternada com frequência na ordem de quilo hertz. Para o circuito mostrado, a tensão alternada é uma forma de onda quadrada, e é obtida com o auxílio de dispositivos semicondutores chaveados. Dispositivos como tiristores podem ser utilizados até frequências de 10kHz, acima disso é necessário usar transistores, conforme Tabela 2.1:

Tabela 2.1 Semicondutores usados para diferentes frequências

Frequência	Semicondutores
<1 kHz	Tiristores
1-10 kHz	Grandes retificadores controlados de silício
10-100 kHz	Transistores de efeito de campo

Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

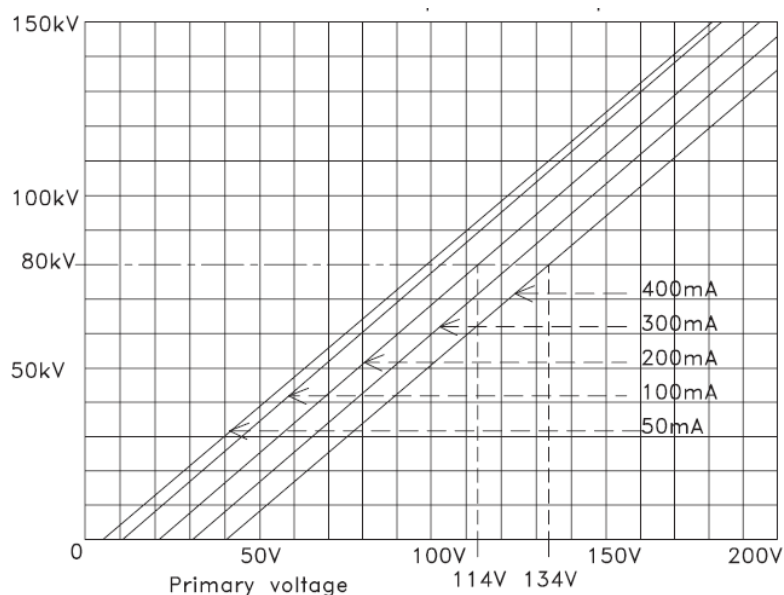
Da saída do inversor, a tensão vai para a entrada do transformador de alta tensão, onde o secundário está na faixa de 90 kV. Da saída do transformador de alta tensão tem-se ainda um retificador de onda completa e um filtro capacitivo, responsáveis por converter a forma de onda CA em CC. Por fim, essa tensão é então aplicada ao tubo de raio X.

A principal diferença entre os dois tipos de emissores está na frequência de operação. Por exemplo, a utilização de altas frequências de chaveamento, no caso do equipamento portátil, possibilita uma significativa redução de suas dimensões. Esse tipo de aplicação utiliza o mesmo princípio do transformador de estado sólido, que é comumente aplicado em redes de distribuição

para, primeiramente, elevar a frequência antes do estágio transformador, e em seguida, retornar à frequência para o nível padrão de 60 Hz.

Uma variação do mA (corrente no tubo de raio X), dada uma mesma tensão em kV no emissor, causa uma variação na tensão do primário do transformador, dado que, ao aumentar o mA, a queda de tensão aumenta, e para suprir a tensão na saída, é necessário aumentar a tensão de entrada. Na Figura 2.8 é possível observar o gráfico ilustrando esse fato.

Figura 2.8 Relação da tensão no primário do transformador, tensão na ampola e corrente na ampola



Fonte: [8]

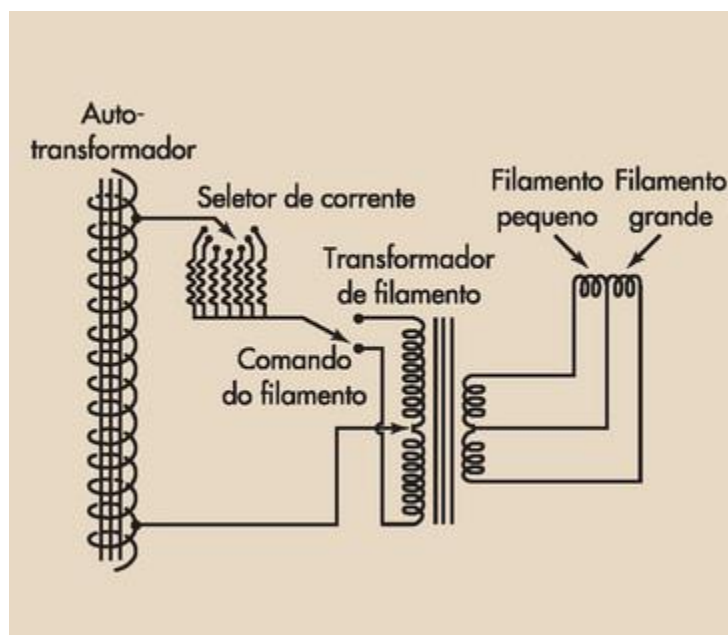
2.1.3. Tensão e corrente da ampola

Conforme mostrado anteriormente, a tensão do emissor mais robusto é controlada quase que 100% por meio de *taps*, já no emissor portátil, podem ser empregadas várias formas de controle. Uma delas seria também por meio de *taps*, e a outra, seria controlar a amplitude da tensão de saída do inversor por meio de uma onda moduladora, sendo esta utilizada para fazer o sinal PWM que é aplicado aos transistores.

Um outro parâmetro importante a ser controlado é a corrente elétrica em mA que percorre o tubo de Raio X do catodo ao anodo, onde o número de elétrons emitidos depende diretamente da temperatura do filamento. A temperatura é diretamente proporcional à corrente que flui pelo filamento, e esta varia entre 3 e 6 A. [3]

Para o controle da corrente do tubo em um emissor de grande porte tem-se o circuito de filamento da Figura 2.9.

Figura 2.9 Circuito do filamento simplificado



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

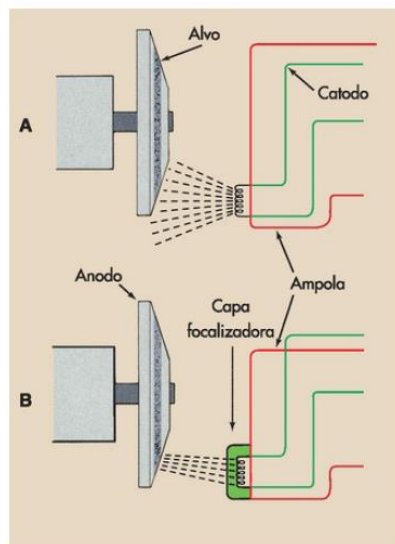
A tensão do circuito de filamento é fornecida pelo autotransformador. Essa tensão passa por um seletor de corrente, formado por resistores de carga, responsável por reduzir a tensão aplicada ao transformador do filamento (transformador abaixador), fazendo a tensão do secundário variar, o que consequentemente varia a corrente do filamento. A tensão do primário é em torno de 150 V e o condutor é feito de um fio fino de cobre e admite corrente de 0,5 a 1 A. A tensão do secundário está em torno de 12 V, e seu filamento carrega uma corrente de 5 a 8 A. A corrente do tubo de raio X pode variar, geralmente entre 3 valores: 100 mA, 200 mA e 300 mA. [3]

O filamento, que é feito de tungstênio com 1 a 2% de Tório [3], geralmente possui 2mm de diâmetro e 1 ou 2 cm de comprimento. O motivo principal do filamento ser de tungstênio é o fato dele conseguir suportar altas temperatura sem grandes alterações em suas propriedades.

Para um melhor entendimento, na Figura 2.10 retirada de [8] pode se ter a visão interna de uma ampola de Raio X.

Uma informação interessante sobre o filamento e o feixe de elétrons, é a capa focalizadora, mostrada na Figura 2.12, que é responsável por focar o feixe de elétrons em uma área menor do anodo. Com isso, é possível obter-se uma imagem de maior qualidade.

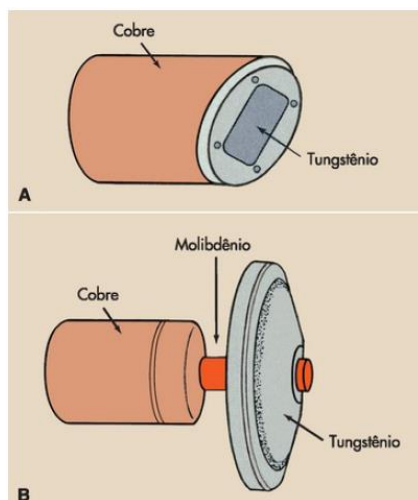
Figura 2.12 Capa focalizadora



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

Outro dispositivo muito utilizado é a grade, que tem a mesma função da capa focalizadora, sendo responsável por comandar a exposição. Após os elétrons serem lançados do filamento, eles vão para o anodo, que pode ser fixo ou giratório conforme mostra Figura 2.13. O motivo de um anodo ser giratório é que o feixe de elétrons, ao ser aplicado em uma área muito pequena, causa aquecimento.

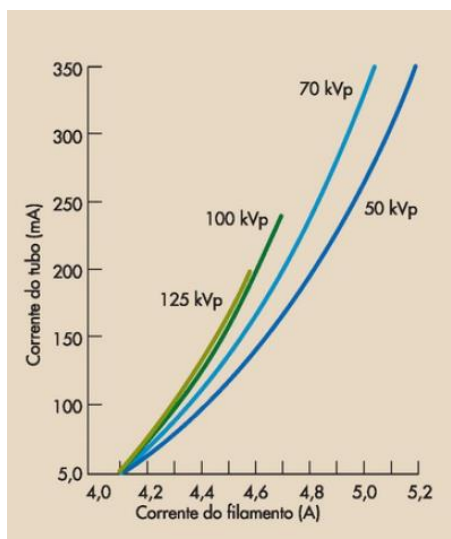
Figura 2.13 Anodo do tubo de Raio X



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

Alguns gráficos do comportamento das tensões e corrente do emissor são importantes para o conhecimento e entendimento do mesmo. Na Figura 2.14 é mostrada a variação da corrente do tubo em função da corrente no filamento para diferentes níveis de tensão.

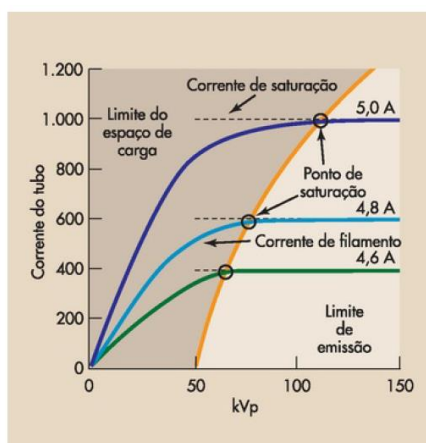
Figura 2.14 Corrente do tubo em função da corrente do filamento



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

Como pode-se notar na Figura 2.14 para diferentes valores de tensão, temos uma curva diferente que relaciona a corrente de filamento com a corrente do tubo, e quanto maior a tensão maior a sensibilidade da corrente do tubo. Pela Figura 2.15, quanto menor a corrente de filamento, menor será o alcance da corrente no tubo, onde, para uma mesma corrente de filamento se aumentarmos a tensão, a corrente no tubo aumenta, ou seja, mais elétrons são lançados, porém tem uma quantidade máxima de elétrons, definindo assim a corrente de saturação. Porém, para uma mesma corrente de filamento, uma tensão maior produzirá uma maior corrente no tubo.

Figura 2.15 Saturação da corrente no tubo



Fonte: Ciência radiológica para tecnólogos, 2010

2.1.4. Controle do tempo de exposição

Um outro parâmetro a ser analisado no emissor de raio X é o tempo de exposição. Esse tempo é definido como o aquele em que o tubo ficará energizado. A quantidade de raios X que será emitida está diretamente relacionada com a corrente do tubo em miliamperes e o tempo de exposição em segundos. Logo, pode-se variar os miliampères aplicado variando qualquer um desses dois parâmetros.

O controle do tempo de exposição é feito interrompendo o circuito da baixa tensão e, conseqüentemente, a tensão de alta, fazendo com que o capacitor descarregue a tensão no tubo de raio X. Em resumo, um emissor de raio X tem dois comandos acionados por botões em um mesmo disparador. Quando o primeiro botão é acionado, o capacitor de alta tensão começa a carregar até se atinja um nível de tensão estabelecido, nesse ponto, o segundo botão é pressionado e o capacitor inicia o processo de descarga no tubo de raio X sendo interrompido por uma grade no tempo de disparo selecionado [8]. Cada um dos estágios de disparo está ilustrado na Figura 2.16 .

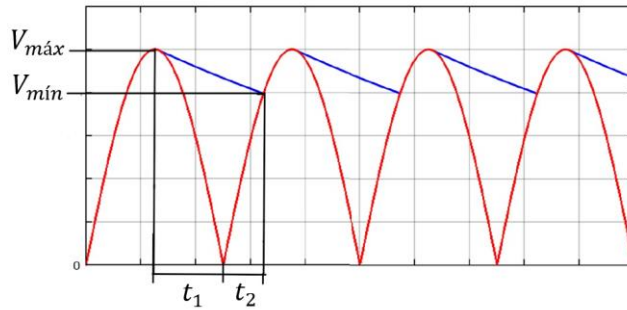
Figura 2.16 Etapas do disparador de Raio X



Fonte: [12]

Os temporizadores mais modernos e precisos são chamados de temporizadores eletrônicos [3]. Bem mais complexos que os temporizadores tradicionais, este tem como princípio básico o tempo necessário para carregar um capacitor através de uma resistência variável. Outro temporizador, também bastante interessante, é o temporizador mAs que utiliza como valor determinado para a abertura do circuito o produto da corrente em mA pelo tempo em segundos [3]. A lógica completa do emissor de raio X pode ser visto na Figura 2.17.

Figura 2.19 Forma de onda retificada e filtrada



Fonte: O autor

Para um retificador de onda completa, aplica-se a equação (12) para calcular o valor de capacitância do filtro.

$$t_1 = \frac{T}{4} \quad (3)$$

Equação da forma de onda da tensão de carga do capacitor

$$V_C = V_{máx} \cdot \text{sen}(2\pi f t) \quad (4)$$

$$V_{mín} = V_{máx} \cdot \text{sen}(2\pi f t_2) \quad (5)$$

$$t_2 = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_{mín}}{V_{máx}}\right)}{2\pi f} \quad (6)$$

Equação da forma de onda da tensão de descarga do capacitor

$$V_C = V_{máx} e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)} \quad (7)$$

$$V_{mín} = V_{máx} e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)} \quad (8)$$

$$C = \frac{-t}{R \cdot \ln\left(\frac{V_{mín}}{V_{máx}}\right)} \quad (9)$$

$$t = t_1 + t_2 = \frac{T}{4} + t_2 = \frac{1}{4f} + \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{V_{mín}}{V_{máx}}\right)}{2\pi f} \quad (10)$$

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (11)$$

Ao combinar as equações 9, 10 e 11, é possível obter a equação 12.

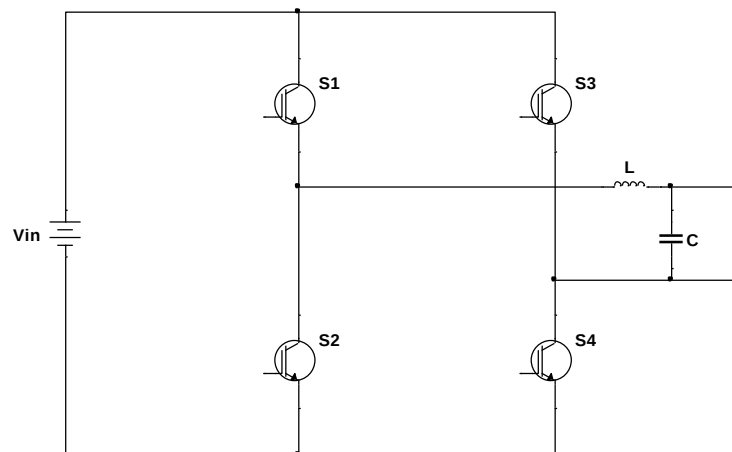
$$C = \frac{-P \cdot \left[\pi + 2 \sin^{-1} \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right) \right]}{4\pi f \cdot V_{\max}^2 \cdot \ln \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right)} \quad (12)$$

Logo, pode-se fazer o cálculo de capacitância escolhendo-se inicialmente a variação de tensão admissível na saída do retificador.

2.3. CONVERSOR CC/CA COM FILTRO LC

O conversor CC-CA, também chamado de inversor, é responsável por transformar uma tensão contínua, em uma forma de onda alternada. Utilizando-se modulação senoidal PWM (*Pulse Width Modulation*), pode-se controlar a amplitude e frequência da tensão de saída por meio da modulante. Conforme mostra a Figura 2.20, os componentes principais de um inversor com filtro são o conjunto de transistores e o capacitor e indutor de saída.

Figura 2.20 Circuito do inversor monofásico de onda completa



Fonte: O autor

A onda modulante é uma senoide de baixa frequência com amplitude variável normalizada comumente em 1 V, enquanto isso, a onda portadora tem amplitude também normalizada em 1 V, porém em alta frequência. Para o controle de amplitude da saída do

inversor, é necessário usar a relação entre as tensões modulante e portadora [4], por meio da equação 13.

$$V_0 = m_a V_{cc} = \frac{V_{m,referência}}{V_{m,portadora}} \cdot V_{cc} \quad (13)$$

Também devem ser considerados os valores de indutância, capacitância e resistência, pois estes influenciam diretamente na resposta do inversor. Uma vez conhecidos os valores de R, L e C, é possível determinar a resposta transitória do circuito. Para os valores utilizados na simulação, que serão apresentados no próximo capítulo, tem-se que o fator de amortecimento é maior que 1, dando origem a uma resposta superamortecida para o sistema. [5]

Para o dimensionamento do filtro LC, foi utilizada a função de transferência mostrada na equação 14, a partir de um fator de amortecimento e uma frequência de corte escolhida.

$$FT(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (14)$$

Onde:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (15)$$

Sendo:

$$f_c = \frac{f_s}{10} \quad (16)$$

e,

$$\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (17)$$

Logo, deve-se calcular R, L e C. A resistência R depende do próprio circuito e a indutância L e capacitância C podem ser calculadas em função do coeficiente de amortecimento e frequência de corte desejada, conforme é mostrado nas equações 18 e 19:

$$C_{filtro} = \frac{1}{2 \cdot R_{eq} \cdot \xi \cdot \omega_c} \quad (18)$$

$$L_{filtro} = \frac{1}{\omega_c^2 \cdot C_{filtro}} \quad (19)$$

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Para o projeto do emissor, foram realizados cálculos para determinação dos componentes do circuito de potência, e a partir dos valores escolhidos, foi realizada a montagem e simulação do circuito em ambiente MATLAB/SIMULINK a fim de que os resultados de funcionamento fossem analisados e comparados com um emissor real.

3.1. FONTE DE KV

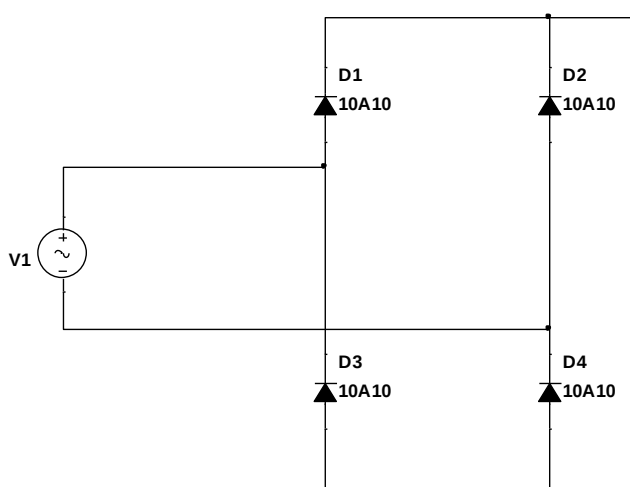
3.1.1. Dimensionamento do conversor CA-CC com filtro capacitivo

O conversor CA-CC pode ser especificado a partir de dois componentes principais: diodos e capacitor. Para o conversor CA-CC, inicialmente foi escolhida a topologia do retificador monofásico de onda completa. Para esse tipo de retificador, a tensão reversa sobre os diodos é a tensão de pico de entrada, ou seja $127\sqrt{2}$ o que representa aproximadamente 180 V. A corrente média será àquela para a potência de 1350 W, conforme equação 20:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1350}{127\sqrt{2}} = 7,51 \text{ A} \quad (20)$$

Logo, considerando tais valores, o modelo de diodo 10A10 foi selecionado, pois suporta 10 A e 1000 volts de tensão reversa. A Figura 3.1 mostra o retificador com os diodos citados. Para o capacitor é necessário, primeiramente, determinar a capacitância de filtro, sendo usada para este fim a equação 12, já mostrada no capítulo anterior. A Tabela 3.1 apresenta valores de capacitância para diversos valores de *ripples* de tensão. Tais valores foram calculados para a frequência de 60 Hz e potência de 1350 W.

Figura 3.1 Circuito retificador de onda completa



Fonte: O autor

Tabela 3.1 Capacitância para diferentes *ripples* de tensão

$V_{mín}/V_{máx}$	$C[\mu F]$
0,1	80,6
0,2	122,2
0,3	172,9
0,4	240,2
0,5	335,4
0,6	481,2
0,7	730,2
0,8	1242,8
0,9	2.834,9
0,92	3.646,4
0,94	5.011,7
0,96	7.771,5
0,98	16.161,8
0,99	33.137,0

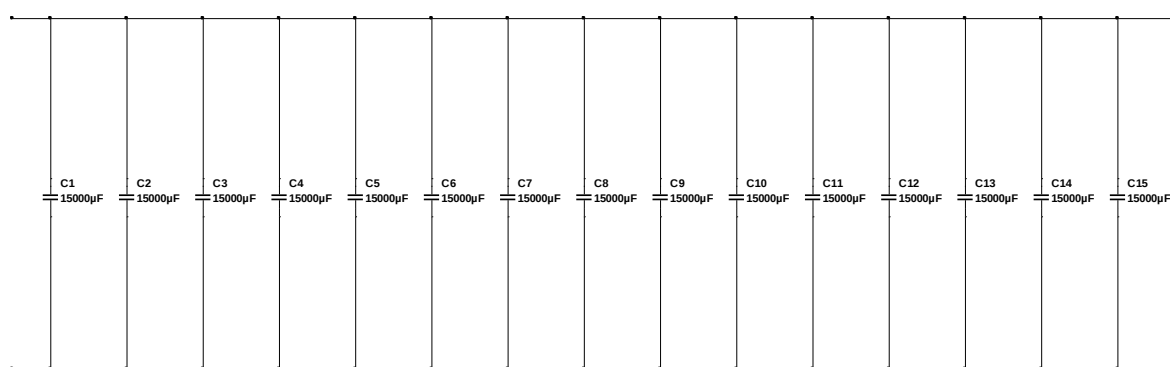
Fonte: O autor

O valor da capacitância escolhida para o circuito é de 15.000 μF , o que proporciona uma variação máxima de tensão próxima de 3%. Para que essa capacitância seja obtida, propõe-se a utilização de 15 capacitores de 1000 μF cada, conectados em paralelo. Como a tensão sobre o arranjo é de 180 V, os capacitores escolhidos suportam 400 V cada. O banco de capacitores é mostrado na Figura 3.2.

Alguns dos problemas que podem ser encontrados é a corrente de *inrush* do capacitor, quando a chave é ligada o capacitor funciona como um curto-circuito, com isso a corrente chega a atingir valores elevados. A simulação do circuito aponta que a corrente do

capacitor poderia chegar a 250 A, portanto é necessário prever a utilização de resistores logo na energização do circuito, e após o carregamento dos capacitores esses resistores são *bypassados*. Na figura 4.4 é possível notar esses resistores na simulação. No resultado da simulação, o valor da corrente continua alto porque o valor do resistor está baixo, porém a o ajuste no valor destes resistores deve ser feito com vistas a não causar distúrbio na rede da concessionária. A inclusão de uma indutância em conjunto com filtro capacitivo foi desconsiderada para que a tensão de saída do retificador ficasse grampeada no pico da senóide de entrada, isso permite melhor aproveitamento da tensão, já que o equipamento é monofásico e necessita de níveis de tensão elevados nos estágio final do circuito.

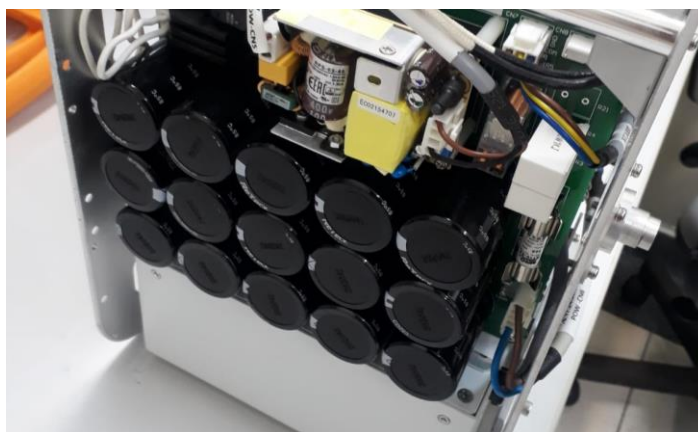
Figura 3.2 Banco de capacitores projetado



Fonte: O autor

O dimensionamento da capacitância e o arranjo utilizado está coerente com o circuito real do equipamento modelo. Como pode ser visto na Figura 3.3, a placa de capacitores do Sontu60 também possui 15 capacitores de 1000 uF em paralelo.

Figura 3.3 Banco de capacitores do emissor portátil Sontu60



Fonte: O autor

Da mesma forma foram feitos os cálculos para o retificador de alta tensão, e após a simulação, foi definida a capacitância de 1nF, onde foram utilizados 2 capacitores de 2nF em série, com o objetivo principal de diminuir a tensão sobre os capacitores. Na Tabela 3.2, obtida da equação 12, pode-se ver que o valor de 1nF faz com que o *ripple* de tensão seja menor que 1%. Os valores de tensão e frequência utilizados para calcular a Tabela 3.2 foram, respectivamente, 40kV e 50kHz.

Tabela 3.2 Capacitância para diferentes *ripples* de tensão para filtro de alta tensão

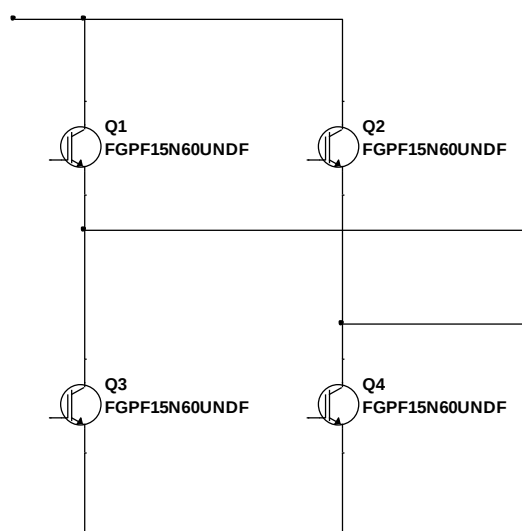
$V_{mín}/V_{máx}$	$C[pF]$	$C[nF]$
0,1	1,95	0,00
0,2	2,96	0,00
0,3	4,18	0,00
0,4	5,81	0,01
0,5	8,12	0,01
0,6	11,64	0,01
0,7	17,67	0,02
0,8	30,07	0,03
0,9	68,59	0,07
0,92	88,22	0,09
0,94	121,25	0,12
0,96	188,02	0,19
0,98	391,01	0,39
0,99	801,70	0,80

Fonte: O autor

3.1.2. Dimensionamento do conversor CC-CA com filtro LC

O Conversor CC-CA é composto, basicamente, por duas partes, sendo estas o estágio inversor e o filtro LC. O inversor projetado deverá apresentar um tempo de resposta considerado rápido para a frequência de 50 kHz, além de suportar 180 volts a uma corrente de 7,51 A. Logo, foi utilizado o IGBT FGPF15N60UNDF que suporta 600V e 15 A. O circuito inversor com o IGBT escolhido é mostrado na Figura 3.4. A escolha do IGBT foi baseada no custo do componente e sua disponibilidade no mercado.

Figura 3.4 Inversor projetado

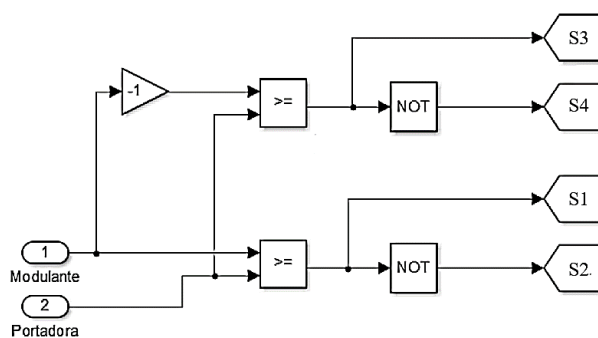


Fonte: O autor

Para fins de dimensionamento foi considerado a menor tensão de operação e a maior corrente na ampola, 40 kV e 25mA, onde pela relação de transformação do transformador a tensão na saída do inversor é de 79,82V. O indutor e capacitor deverão também suportar uma tensão de 180 Volts de pico. Para o dimensionamento dos valores de indutância e capacitância do filtro LC, foram utilizadas as equações 18 e 19, obtendo-se os valores de 20 mH para indutância e 124,92 nF para a capacitância. O valor da frequência de corte empregada foi de 100 kHz, o fator de amortecimento igual a 1, a tensão de pico foi de 79,82 V e resistência equivalente de 6,37 ohms.

O inversor utilizado para o projeto será do tipo ponte completa com PWM senoidal a três níveis. Para esse tipo de PWM, tem-se o circuito de acionamento das chaves conforme mostrado na Figura 3.5

Figura 3.5 Circuito do PWM de chaveamento do inversor



Fonte: O autor

Nas simulações realizadas, a frequência de chaveamento adotada tem o valor de 250 kHz, o que é considerada elevada para fins de implementação prática, porém foi utilizada apenas para simular e analisar o funcionamento do equipamento. No caso de implementação tanto a frequência da tensão de saída e a frequência de chaveamento serão reavaliadas e ainda, serão definidas observando as características do núcleo do transformador. Adicionalmente, a frequência de corte do filtro e de chaveamento são relativamente próximas, fazendo com que a tensão na saída do inversor não será totalmente senoidal. Contudo, para o circuito estudado não é necessário que essa tensão tenha baixa distorção, uma vez que será retificada após a etapa de elevação. A filtragem da tensão foi adotada apenas para melhorar a transferência de potência no transformador, porém, o fato da modulação senoidal exigir uma portadora em frequência muito alta, faz com o inversor operando com onda quadrada na saída pode ser mais viável em caso de implementação, dispensando também o filtro LC. A comparação entre ambas as possibilidades será melhor avaliada em trabalhos futuros.

No presente estudo, os valores de indutância e capacitância do filtro LC foram definidos por meio de simulação, sendo que os valores finais do projeto são 124,92 nF para capacitância e 20 uH para a indutância, conforme equação 16 e 17.

$$R_{eq} = \frac{40000 V}{0,025 A} \cdot \left(\frac{127\sqrt{2}}{90000} \right)^2 = 6,37 \Omega \quad (15)$$

$$C_{filtro} = \frac{1}{2 \cdot R_{eq} \cdot \xi \cdot \omega_c} = \frac{1}{2 \cdot 6,37 \cdot 1 \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot 10^3} = 124,92 nF \quad (16)$$

$$L_{filtro} = \frac{1}{\omega_c^2 \cdot C_{filtro}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 100 \cdot 10^3)^2 \cdot 124,92 \cdot 10^{-9}} = 20 uH \quad (17)$$

3.1.3. Dimensionamento do transformador

Para o transformador será considerada a tensão máxima de 90kV, sendo a tensão máxima de entrada igual a 170V, controlada pelo inversor. Já considerando as perdas, a relação de espiras do transformador é dada pela equação 18:

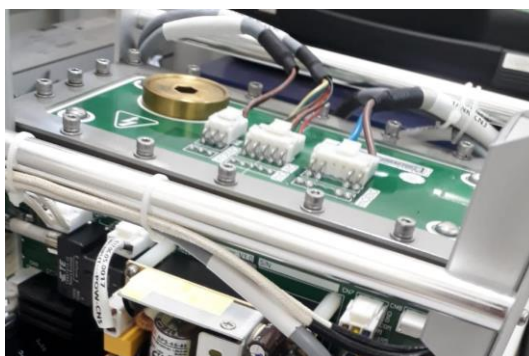
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{90000}{170} = 529,4 \quad (18)$$

O transformador será submetido a uma frequência de 50 kHz a uma potência máxima de 1350 W, que pode ser determinado pela equação 19. Sabendo que a corrente no anodo para a tensão de 90 kV é de 15 mA, tem-se:

$$P = VI = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 90 \cdot 10^3 = 1350 \text{ W} \quad (19)$$

Ao observar o equipamento de modelo Sontu60, mostrado na Figura 3.6, nota-se que o transformador não é visível. Da mesma forma, os componentes de alta tensão também não estão visíveis. Isso se dá pelo fato do transformador, assim como os componentes do circuito de alta tensão, estarem em um mesmo bloco, chamado de *tank*, todos isolados a óleo. Por se tratar de um componente bastante específico por conta dos altos níveis de tensão e frequência, não foi encontrado no mercado equipamento semelhante e /ou que apresentasse características que atendessem a demanda do projeto. Logo, em caso de implementação será necessário customizar o desenvolvimento deste circuito *tank*.

Figura 3.6 Saída do transformador de alta tensão do Sontu60



Fonte: O autor

3.2. CONTROLE DE CORRENTE (mA)

Como foi discutido anteriormente, o controle da corrente no anodo pode ser feito variando-se a tensão do filamento, seja por meio de resistores ou pelo uso de um conversor devidamente projetado. Sendo o intuito principal projetar somente a parte de potência do emissor de raio x, neste trabalho foi considerado somente um circuito simples de filamento, que, a partir da seleção de um valor de corrente, altera-se diretamente a tensão do primário do transformador do filamento.

4. RESULTADOS

Por meio da simulação, foram obtidos os resultados para o projeto, que serão analisados neste capítulo. Primeiramente, será observado o comportamento das correntes do filamento e do anodo em função da tensão de filamento. Em seguida, serão analisadas as formas de onda, em cada parte do circuito, para um valor escolhido de mAs e de tensão. Para ambas as curvas, a tensão de referência é 40kV.

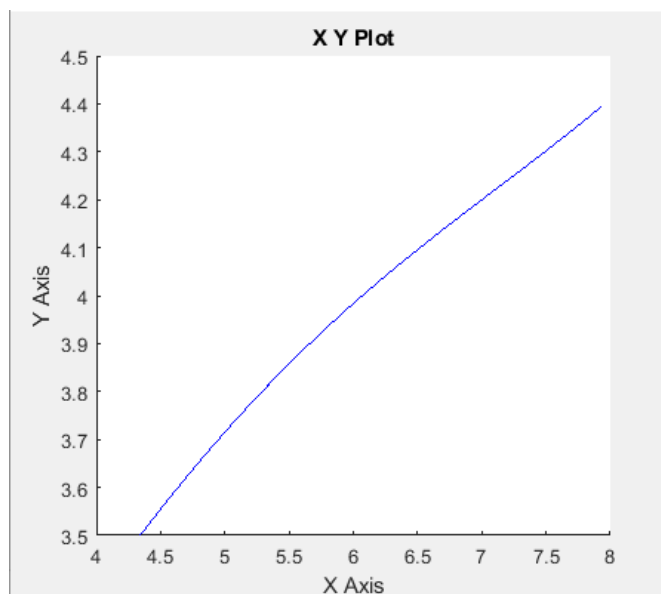
4.1. TENSÃO NO FILAMENTO, CORRENTE NO FILAMENTO E CORRENTE NO ANODO

Para verificar como a corrente no anodo e a corrente no filamento se comportam com a variação da tensão no filamento, a tensão no primário do transformador de filamento foi variada de forma linear em relação ao tempo, obtendo-se duas curvas. A tensão utilizada nas duas curvas foi de 40 kV.

A primeira curva a ser analisada é da corrente no filamento em função da tensão do filamento, conforme mostra a Figura 4.1. Como pode-se observar, a corrente no filamento não apresenta um crescimento tão acentuado em relação à variação de tensão. Ainda, nota-se que a tensão mínima utilizada na simulação é 4 volts, isso ocorre pois para este valor de tensão, tem-se a corrente mínima do anodo, que é necessária para o aquecimento inicial do filamento, responsável por iniciar a liberação de elétrons, conforme mostrado a seguir. A segunda curva a ser analisada é justamente a variação da corrente no anodo em função da tensão do filamento, o resultado é mostrado na Figura 4.2.

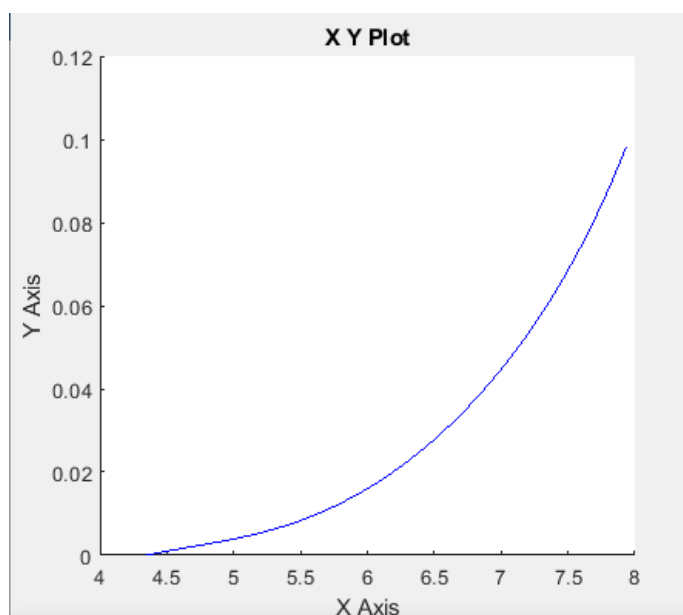
De acordo com a Figura 4.2, é necessária uma tensão mínima de 4,3 volts no filamento para que se inicie a circulação de corrente no anodo. Também, é possível observar que a corrente no anodo apresenta um crescimento lento no início e que, após um certo ponto, a corrente aumenta rapidamente diante de uma pequena variação de tensão. Para essa simulação, foi utilizado um valor máximo de 120 mA de corrente admitido no projeto.

Figura 4.1 Corrente do filamento (Eixo Y) em Ampères, em função da tensão do filamento (Eixo X), em Volts



Fonte: O autor

Figura 4.2 Corrente do anodo (Eixo Y), em Ampères em função da tensão do filamento (Eixo X), em Volts



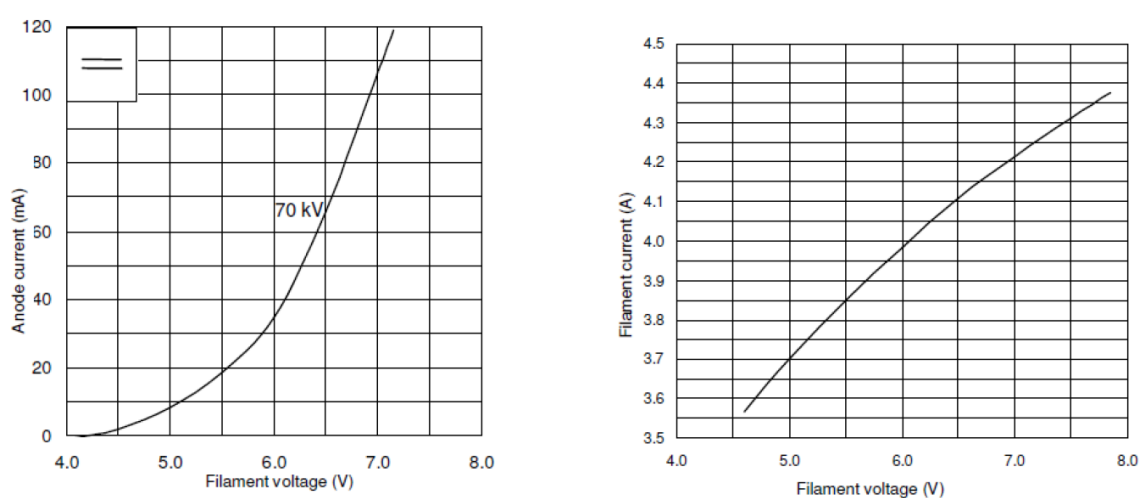
Fonte: O autor

Para se obter as Figuras 4.1 e 4.2, foi utilizado um resistor variável para representar tanto o filamento quanto a ampola, e para cada um desses resistores, foi usada uma função baseada em um resultado real. A resistência da ampola, por exemplo, variava

proporcionalmente com a corrente no filamento, uma vez que quanto maior a corrente no filamento, maior é a temperatura, causando o aumento da emissão de elétrons.

Para fins de comparação, a Figura 4.3 apresenta as curvas de corrente no filamento e no anodo em função da tensão no filamento para um emissor de raio x portátil modelo Jade fornecidas pelo fabricante.

Figura 4.3 Gráficos da corrente no anodo e corrente no filamento em função da tensão no filamento, do emissor portátil JADE



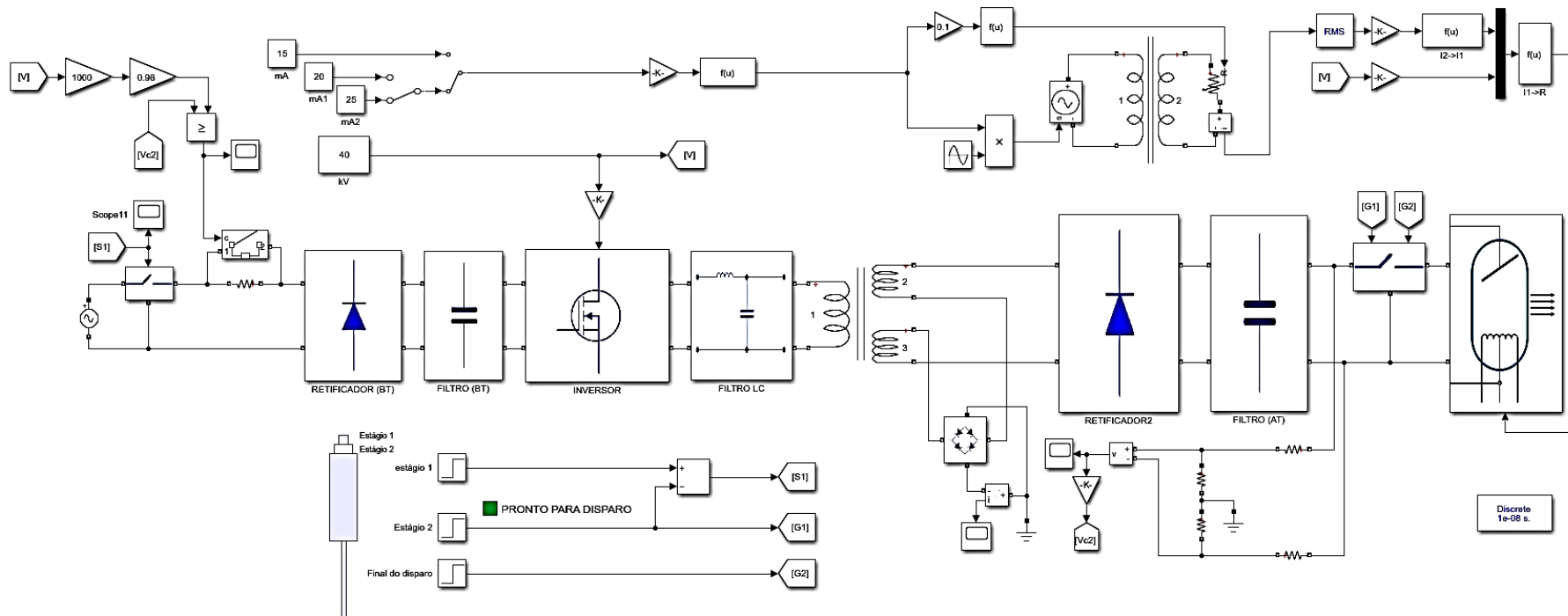
Fonte: JADE, Mobile X-ray System Service Manual,

4.2. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA FONTE DE TENSÃO KV

Uma vez levantados os resultados da parte de potência, foram gerados alguns resultados que refletem o funcionamento do sistema. As simulações apresentadas a seguir consideram uma tensão de 40 kV, corrente de 25 mA, e tempo de exposição de 2ms.

O circuito de simulação completo pode ser visto na Figura 4.4. Conforme apresentado, a alimentação de entrada é senoidal de 127 volts eficaz, conforme a Figura 4.5. Essa tensão passa por um retificador de onda completa seguido por um filtro capacitivo, tornando a tensão de saída praticamente constante, com um *ripple* de tensão quase nulo, conforme mostra a Figura 4.6.

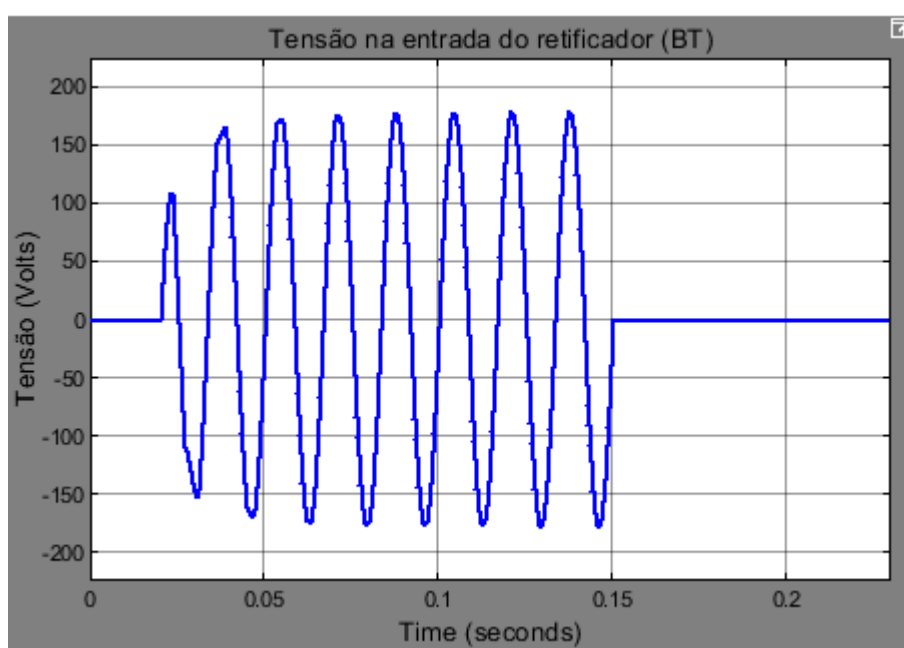
Figura 4.4 Circuito de simulação completo



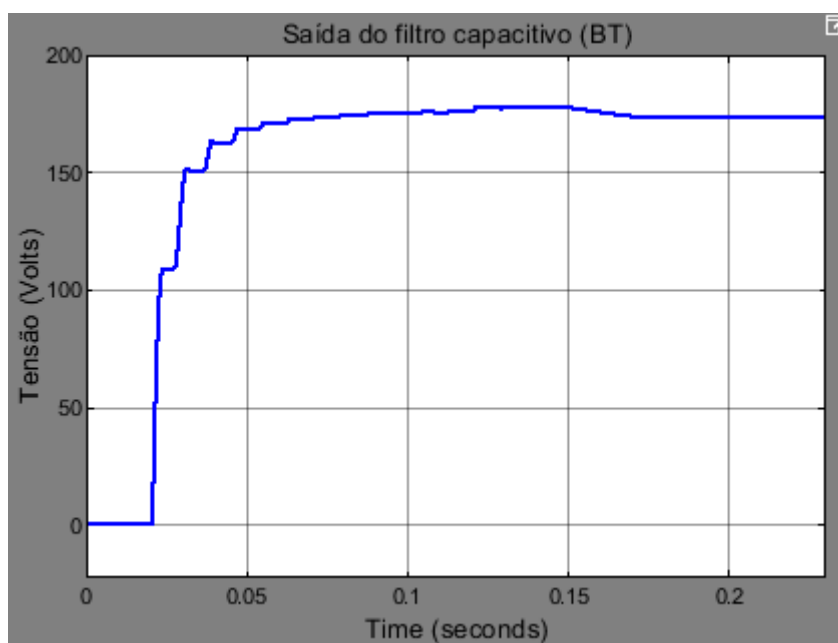
Fonte: O autor

A tensão CA na entrada do retificador, assim como após o filtro capacitivo, só apresenta valores entre os instantes 20 ms e 150 ms, representando o primeiro e segundo estágio, respectivamente. Os estágios de um disparador são mostrados na Figura 4.9. Quando o primeiro estágio é ativado, o relé representado por uma chave na Figura 4.4 é fechado fazendo com que o circuito receba tensão, já quando o segundo estágio é acionado, a chave abre, fazendo com a tensão seja interrompida.

Figura 4.5 Tensão da entrada de energia, t [s] x V [V]

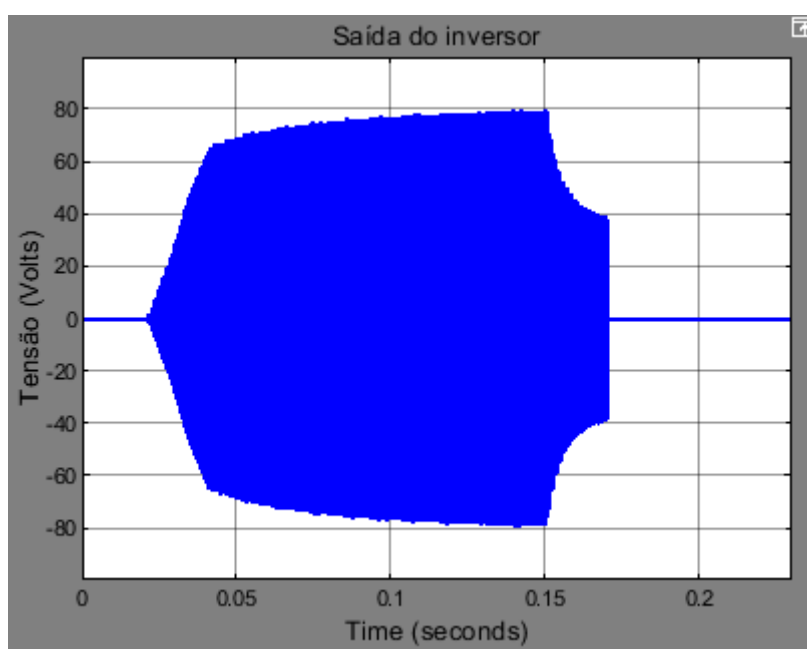


Fonte: O autor

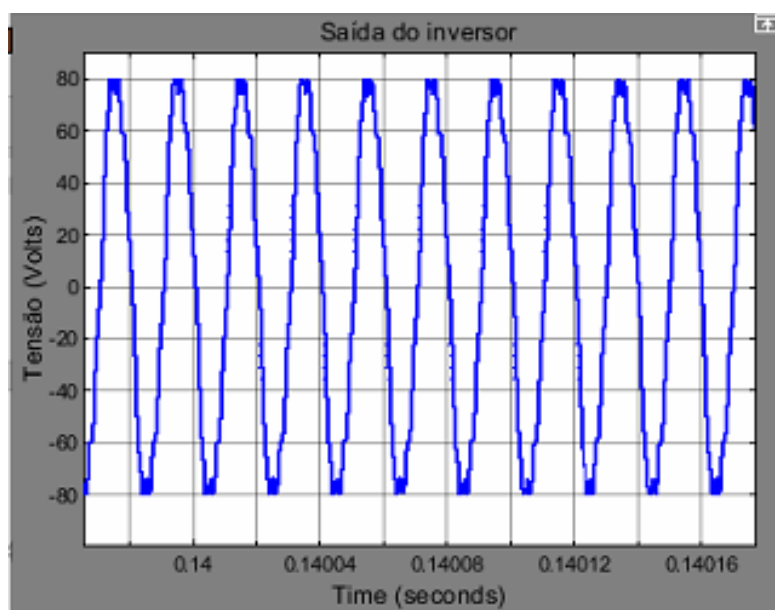
Figura 4.6 Tensão retificada e filtrada por um filtro capacitivo, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

Ao se tornar CC, a tensão passa pelo estágio inversor, que junto com um filtro LC, tornando a tensão novamente CA em alta frequência (50 kHz). Este resultado é apresentado na Figura 4.7 e Figura 4.8. A amplitude da tensão pode ser variada com valor máximo próximo a $127\sqrt{2}$.

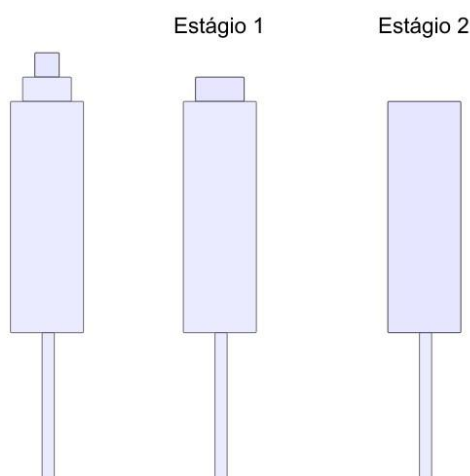
Figura 4.7 Tensão após o estágio inversor e filtro LC, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

Figura 4.8 Tensão após o estágio inversor e filtro LC, com mais detalhes, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

Figura 4.9 Disparador do emissor de Raio X



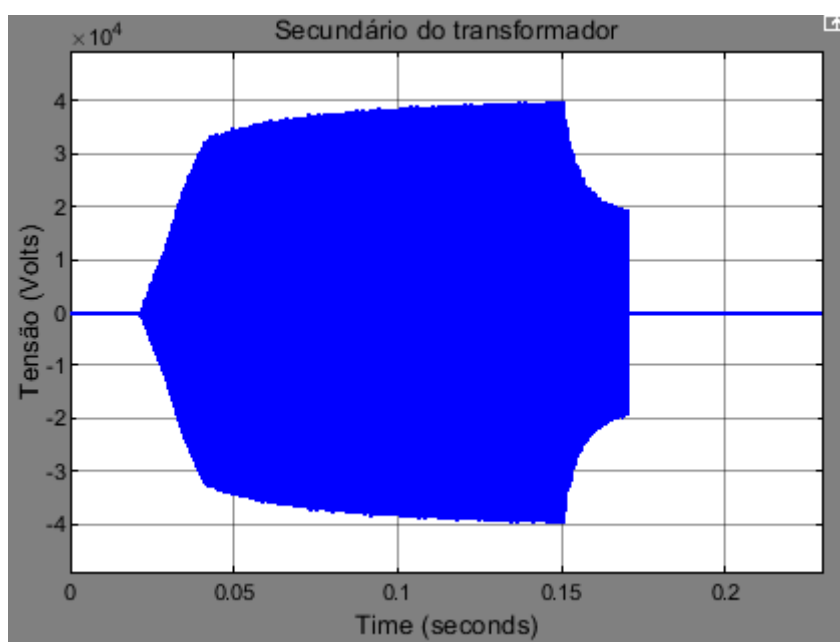
Fonte: O autor

O disparador apresenta 2 estágios, sendo que no primeiro estágio, inicia-se o processo de carregamento do capacitor de alta tensão. No final do processo, uma vez a carga completa, uma lâmpada torna-se ativa indicando que o emissor está pronto para o disparo. Ao pressionar o disparador completamente, inicia-se o segundo estágio, onde a lâmpada torna-se intermitente até que se complete o tempo de exposição estabelecido. Durante o segundo estágio, é iniciada a descarga do capacitor, até que o tempo selecionado seja

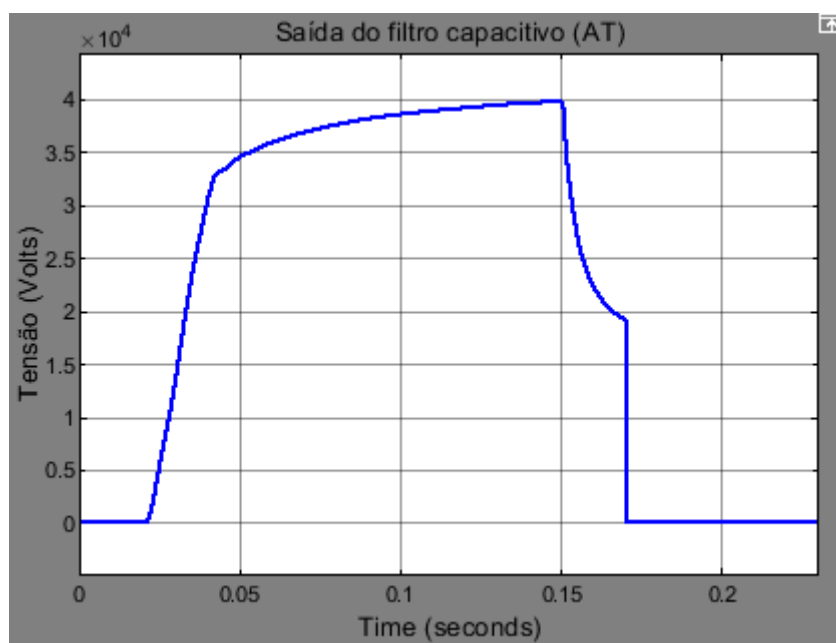
alcançado. Nesse ponto, o botão deve retornar ao repouso. Caso o processo seja interrompido ou todas as indicações do emissor não sejam seguidas, a qualidade da imagem é prejudicada.

Na simulação apresentada, o estágio 1 foi ativado no instante 20 ms, e o estágio 2, em 150 ms. Logo, em 20 ms o transformador recebe a tensão do inversor, permanecendo até que o tempo seja igual a 150 ms. Na Figura 4.10 é possível observar a tensão no secundário do transformador conforme foi mencionado. Como pode ser visto, a tensão na saída do transformador tem 40kV de tensão de pico e frequência de 50 kHz. O tempo de disparo utilizado na simulação foi de 20 ms, e como a descarga do capacitor na ampola inicia-se em 150 ms, tem-se que a tensão na ampola é interrompida no instante 170 ms com a descarga completa do capacitor em um resistor de alta potência, conforme mostra-se na Figura 4.11.

Figura 4.10 Tensão na saída do transformador



Fonte: O autor

Figura 4.11 Tensão no capacitor de alta tensão, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

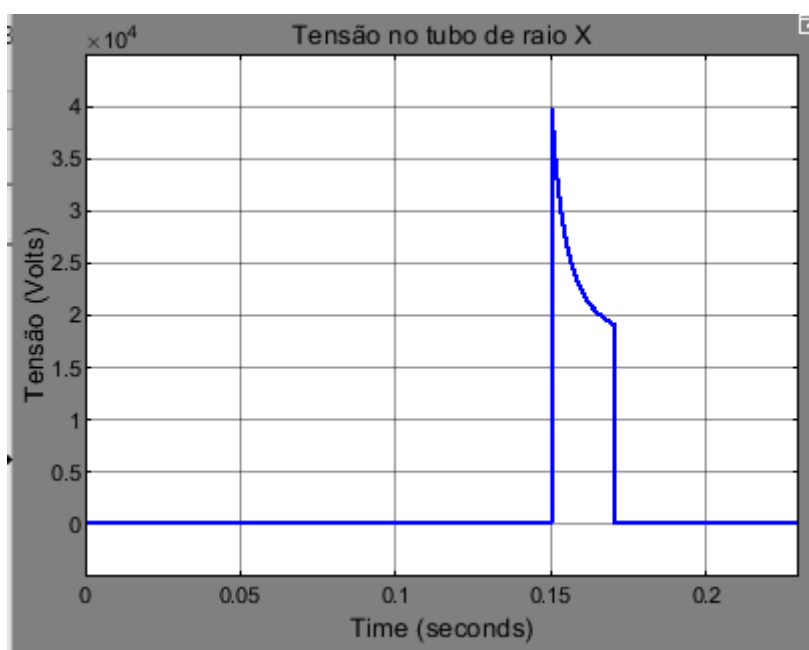
Quando o sistema está pronto para o disparo, ou seja, quando o capacitor está totalmente carregado, uma lâmpada led se torna ativa. Para se fazer a leitura da alta tensão, é usado um divisor de tensão de alta resistência, tornando a tensão medida 10000 vezes menor que o real, conforme é mostrado na Figura 4.12.

Figura 4.12 Tensão no capacitor de alta tensão com destaque no carregamento do mesmo, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

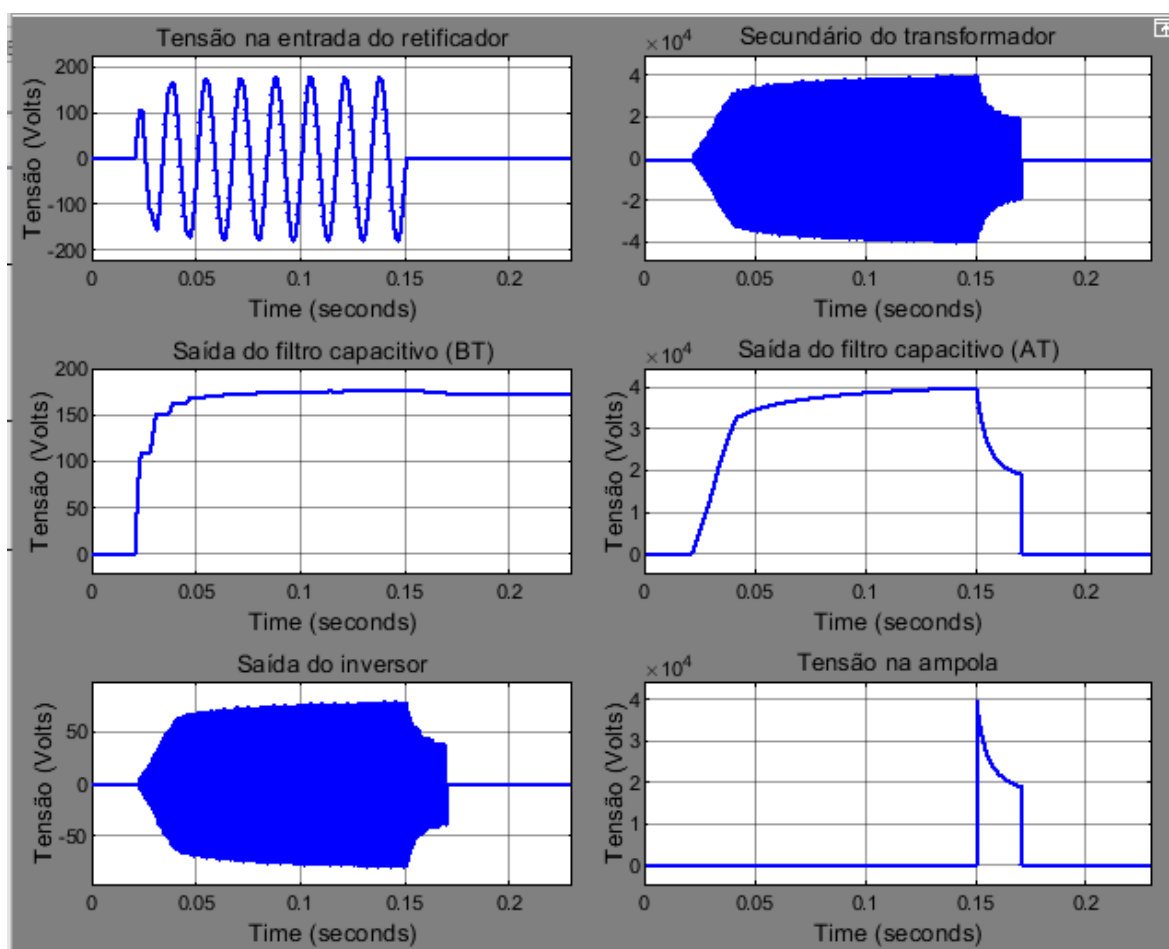
Como foi informado, a tensão no capacitor é descarregada na ampola de raio X no tempo de 150 ms e interrompida no tempo de 170 ms, quando o tempo de disparo é alcançado. O gráfico da tensão na ampola pode ser visto na Figura 4.13.

Figura 4.13 Tensão no tubo de Raio X, t [s] x V [V]



Fonte: O autor

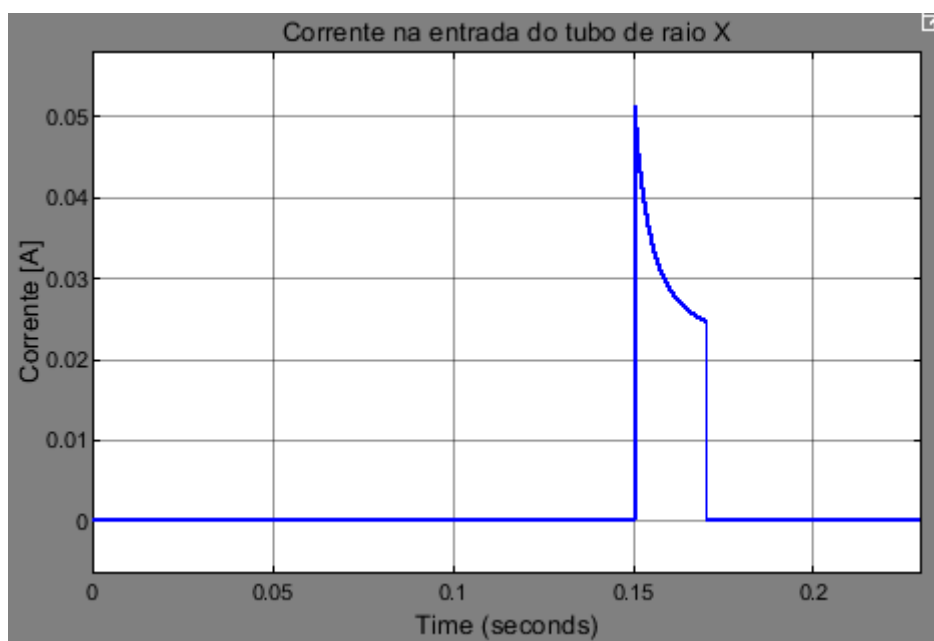
Também é possível visualizar de forma mais completa cada uma dessas tensões em uma única figura, conforme é mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 Tensões no circuito de potência, t [s] x V [V]

Fonte: O autor

A corrente como citada acima foi de 25 mA, essa corrente foi medida na entrada da ampola e é mostrada na figura a seguir:

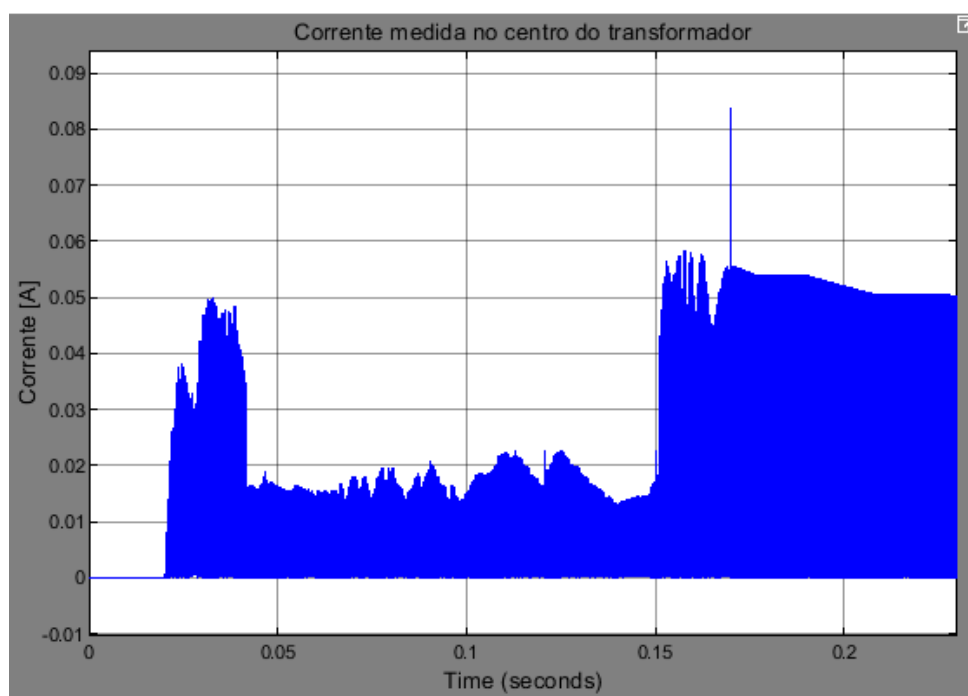
Figura 4.15 Corrente medida na entrada da ampola



Fonte: O autor

A corrente na prática é retirada do meio do transformador, conforme já foi citado, ou seja é medida sem filtro, conforme é mostrado na figura:

Figura 4.16 Corrente medida no centro do secundário do transformador

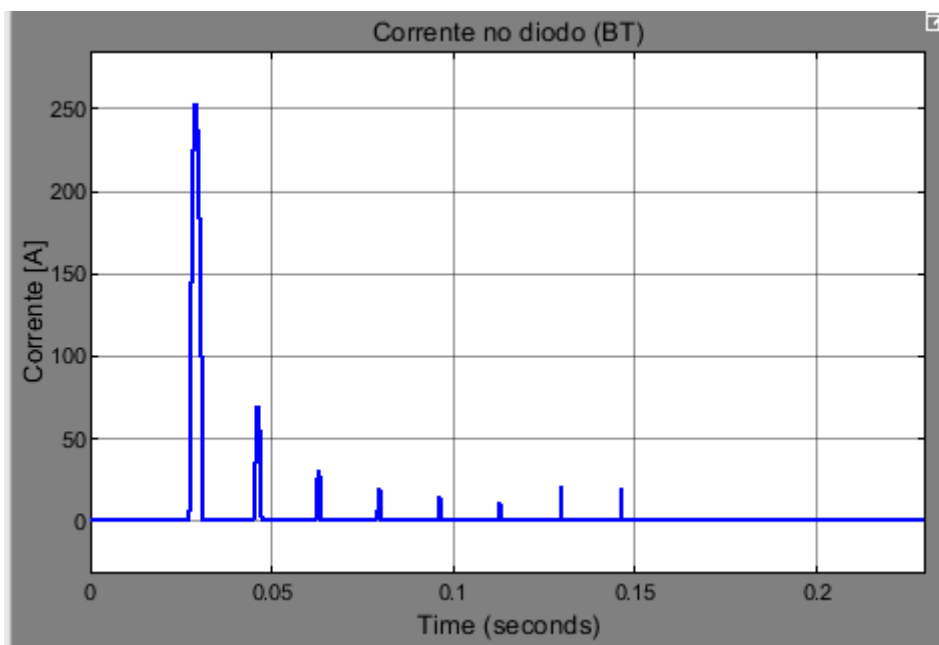


Fonte: O autor

Também podemos mostrar a corrente e tensão para os dispositivos semicondutores:

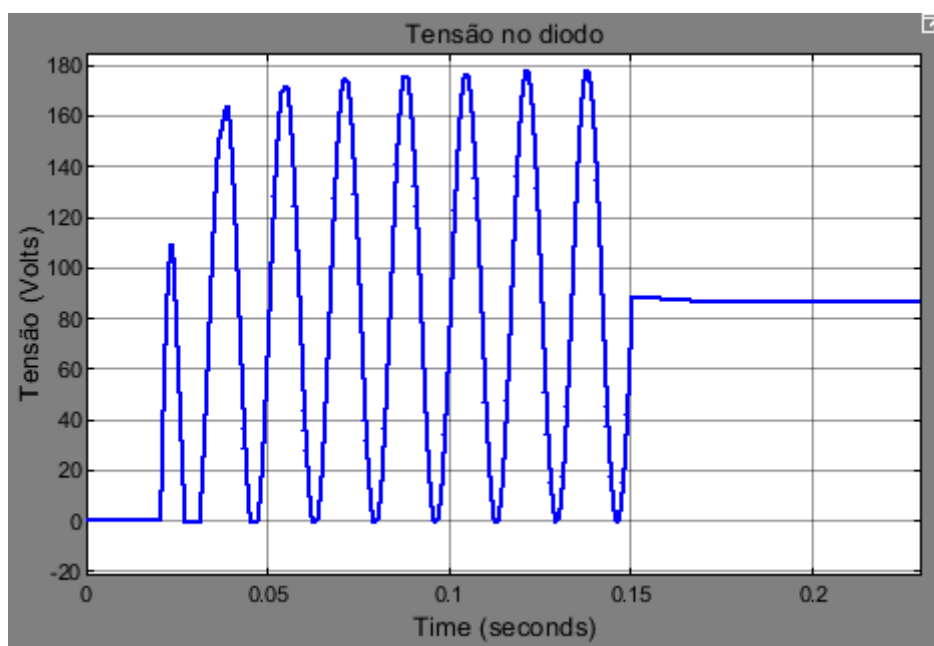
A corrente e tensão no retificador da baixa tensão é mostrado nas figuras 4.17 e 4.18 a seguir:

Figura 4.17 Corrente medida no diodo do retificador (BT)



Fonte: O autor

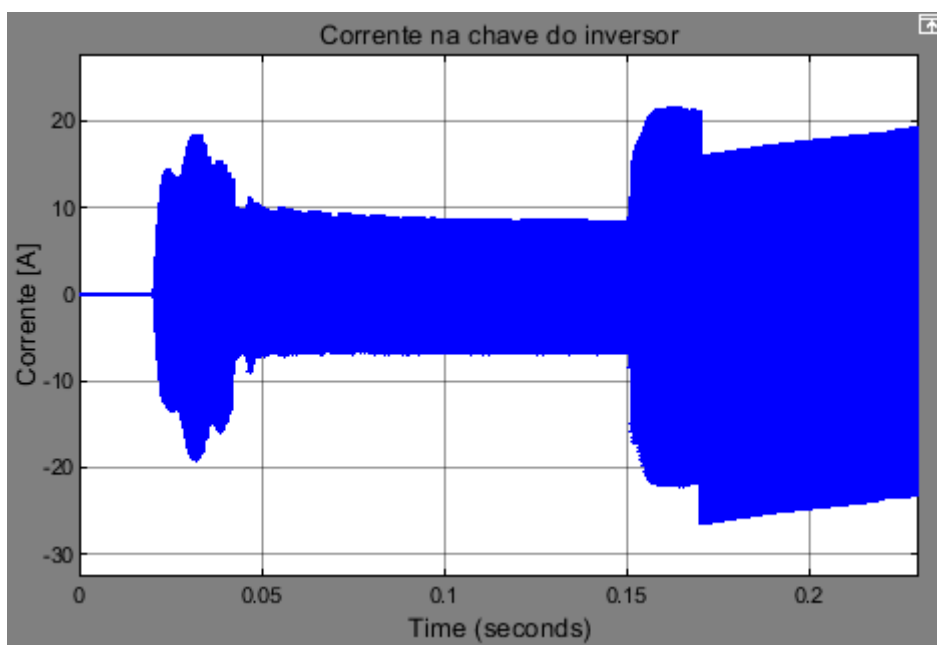
Figura 4.18 Tensão medida no retificador (BT)



Fonte: O autor

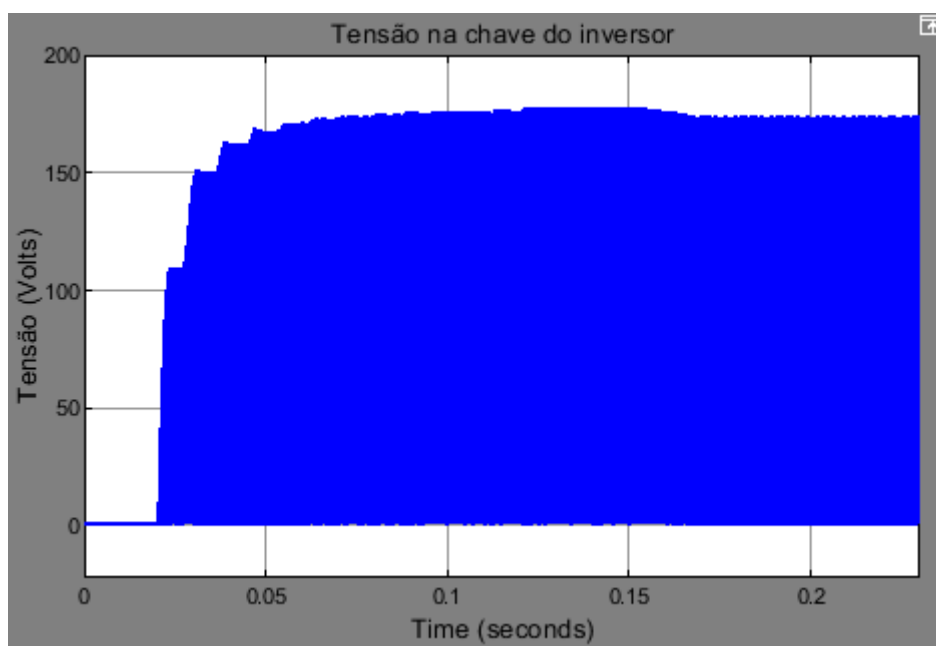
A corrente e tensão na chave do inversor é mostrado nas figuras 4.19 e 4.20

Figura 4.19 Corrente medida na chave do inversor



Fonte: O autor

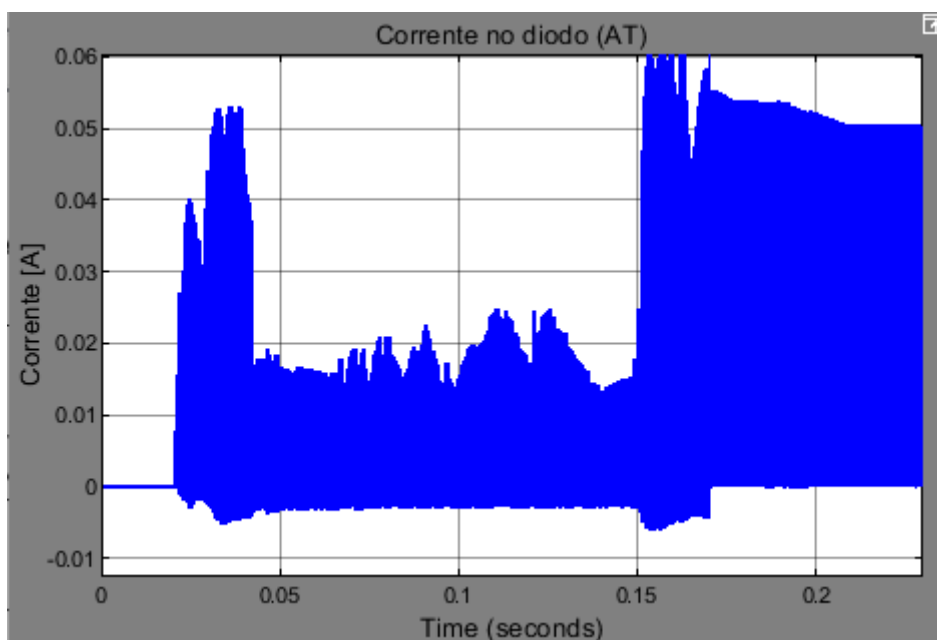
Figura 4.20 Tensão medida na chave do inversor



Fonte: O autor

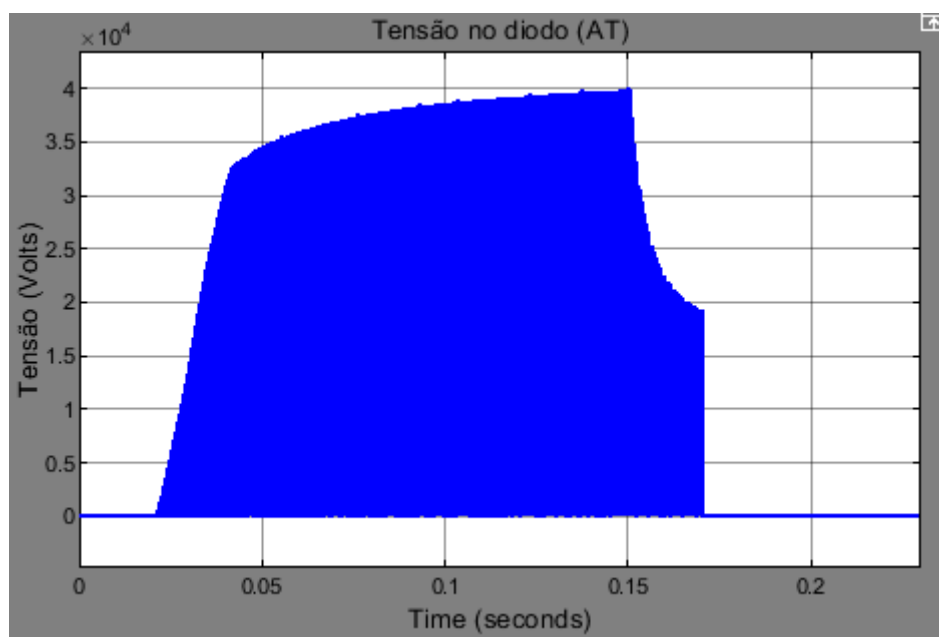
A corrente e tensão no diodo do retificador da alta tensão é mostrado nas figuras 4.21 e 4.22

Figura 4.21 Corrente medida no diodo do retificador (AT)



Fonte: O autor

Figura 4.22 Tensão medida no diodo do retificado (AT)



Fonte: O autor

As simulações apresentadas foram realizadas para um cenário específico, com um valor determinado de tensão na ampola, em kV, um valor de corrente na ampola em mA e um tempo de exposição. Porém, diferentes pontos de operação podem ser explorados com o modelo construído neste trabalho. Os resultados apresentados estão de acordo com o esperado, obtendo assim um resultado satisfatório.

5. CONCLUSÕES GERAIS

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou conhecer de forma mais detalhada o esquemático geral de um emissor de Raio X, desde a entrada de energia até a emissão do mesmo. De forma geral obteve-se êxito nos objetivos propostos, já que o circuito apresentado por estágios, foi capaz de fornecer as tensões adequadas de modo a aplicar na ampola, o valor em kV selecionado.

A simulação do circuito no software Matlab/Simulink foi fundamental para o entendimento do emissor, pois através do modelo montado foi possível analisar as formas de ondas da tensão desde a entrada até a parte de alimentação do tubo de Raio X. Também através da simulação pôde-se levantar algumas dificuldades em relação aos componentes, já que em algumas partes do circuito opera em frequência alta demandando componentes mais específicos. No circuito de potência, que foi o foco principal do trabalho, obteve-se um resultado considerado satisfatório já que as formas de ondas apresentam aspecto conforme esperado. Contudo, ressalta-se a dificuldade de se implementar este sistema devido ao estágio de alta tensão. Na prática é exigido um cuidado especial com o transformador elevador e o retificador de alta tensão.

O subcircuito do filamento também teve o seu comportamento modelado, principalmente na parte em que conecta o circuito do filamento com o circuito de potência onde se tem a alta tensão. No circuito real, a corrente da ampola depende diretamente da temperatura do filamento, com isso foi usado um resistor variável que altera a resistência conforme a corrente no filamento, emulando o fato de que quanto maior a corrente no filamento, maior a temperatura, e com isso maior quantidade de elétrons são emitidos.

Também por meio do trabalho pode-se conhecer melhor os tipos de emissores e suas principais diferenças, e conforme foi-se estudando mais sobre cada um, pode-se concluir que o emissor portátil combina muito bem praticidade e tecnologia. O emissor portátil é praticamente a aplicação completa de eletrônica de potência e controle que são áreas que avançaram bastante nos últimos anos, fato que pode ser evidenciado pelas tecnologias mais modernas no mercado.

O emissor de Raio X, por mais que se tenha criado a algumas décadas, é um equipamento que ainda está em melhoria, já que apresenta um grande risco se for projetado de forma não adequada. O emissor, em específico o portátil, trata-se de um equipamento com poucos fabricantes no Brasil, e com isso é possível visualizar uma grande área para se aperfeiçoar e até criar um equipamento com tecnologia nacional. Ainda há outras áreas a serem estudadas para se criar um projeto completo, mas o conceito geral e as partes principais do circuito de potência são conhecimentos adquiridos por meio deste trabalho.

Como trabalhos futuros, pode-se mencionar a especificação mais detalhada do transformador, elemento fundamental para se chegar nos níveis de tensão necessários. Além disso, no âmbito de um equipamento completo, existe ainda toda a parte de interface com o usuário, sistemas de controle e sensoriamento necessário. Importante mencionar ainda que, por se tratar de um equipamento médico, todas as normas de segurança devem ser rigorosamente observadas, fazendo com que o projeto inicial e os passos futuros possam sofrer algum tipo de alteração.

6. REFERÊNCIAS

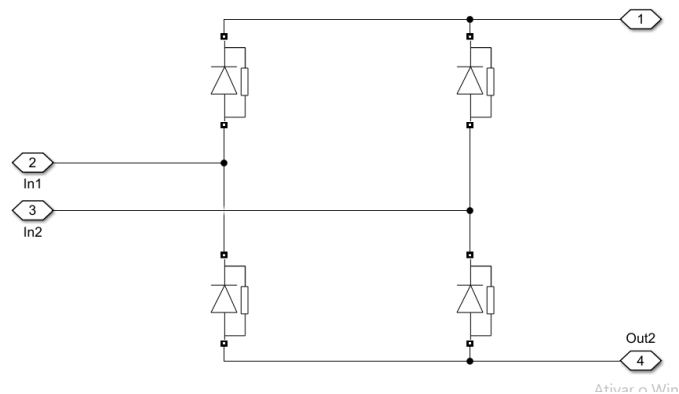
- [1] BOYLESTAD, R. L. **Introdução á análise de circuitos**. Tradução: Daniel V. e Jorge R. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- [2] BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- [3] BUSHONG, S. C. **Ciência radiológica para tecnólogos: Física, Biologia e Proteção**. Tradução: Sandro M. D...et al. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- [4] HART, D. W. **Eletrônica de potência: Análise e projetos de circuitos**. Tradução: Romeu Abdo. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- [5] NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. Tradução: Jackson P. M. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [6] SOARES, J. C. **Princípios de física em radiodiagnóstico**. 2. ed. rev. São Paulo: Colégio Brasileiro de Radiologia, 2008.
- [7] DENTAL X-RAY Belray II 097: Service Manual (for 220v, 230v, 240v). Osaka: Belmont, 2011. Disponível em: <<https://files8.design-editor.com/94/9408323/UploadedFiles/FE2654DD-7218-F7EB-7C1A-B00C5F02E9A7.pdf>>. Acesso em: 25 Out. 2021.
- [8] MCCLELLAND I. R. **X-Ray equipment maintenance and repairs workbook for radiographers & radiological technologists**. Geneva: World Health Organization, 2004. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42952/9241591633.pdf;sequence=1>>. Acesso em: 15 Nov. 2021.
- [9] **OWNER'S MANUAL: Panoramic x-ray eagle**. DabiAtlante, 2018.
- [10] **X-RAY GENERATOR (HF 300/ HF 600/ HF 3SE/ HF 3SEE) OPERATORS MANUAL**. Springfield: HCMI, 2004. Disponível em: <<file:///C:/Users/iCRX%20Solutions/Downloads/304668318-Hf-Xray-Generator-Complete-Manual-and-Schematics-Rev-0604200.pdf>>. Acesso em: 10 Nov. 2021.

-
- [11] **OPERATORS MANUAL** and Installation and service manual. Del Medical Imaging Corporation, 2001. Disponível em: <http://frankshospitalworkshop.com/equipment/documents/x-ray/service_manuals/Del%20Uni-Matic%20325D%20X-Ray%20Generator%20-%20User%20and%20service%20manual.pdf>. Acesso em: 08 Out. 2021.
- [12] **SR-8100 PORTABLE X-RAY UNIT: Operation Manual**. Hamburg: SIUI. Disponível em: <http://www.atomvet.cz/admin/fckeditor/userfiles/file/manualy/SIUI%20SR-8100_OPERATION_MANUAL_V3.2.pdf>. Acesso em: 01 Nov. 2021.

7. APÊNDICE A - MODELOS DE SIMULAÇÃO

A.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

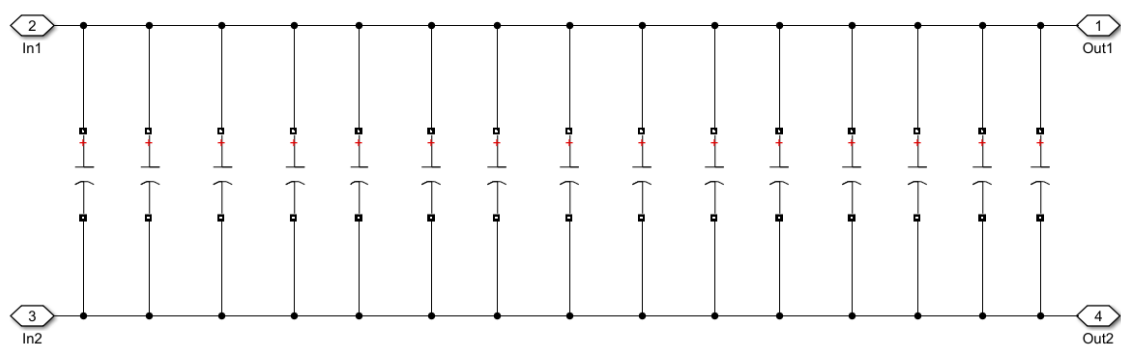
Figura 7.1 Retificador de onda completa no MatlabSimulink



Fonte: O autor

A.2 FILTRO CAPACITIVO DE BAIXA TENSÃO

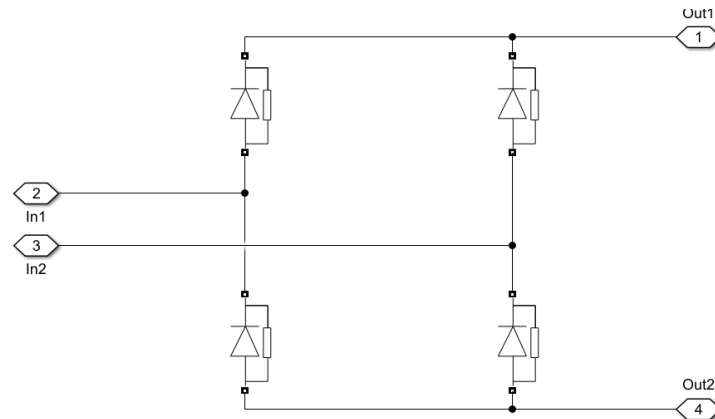
Figura 7.2 Filtro capacitivo de baixa tensão no Matlab/Simulink



Fonte: O autor

A.5. RETIFICADOR DE ALTA TENSÃO

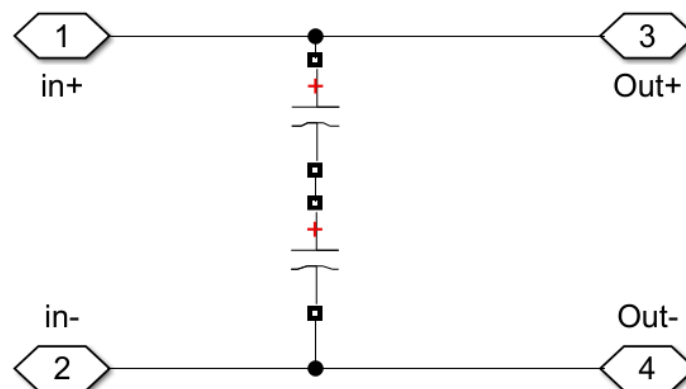
Figura 7.5 Retificador de onda completa (alta tensão) no Matlab/Simulink



Fonte: O autor

A.6 FILTRO CAPACITIVO DE ALTA TENSÃO E ALTA FREQUÊNCIA

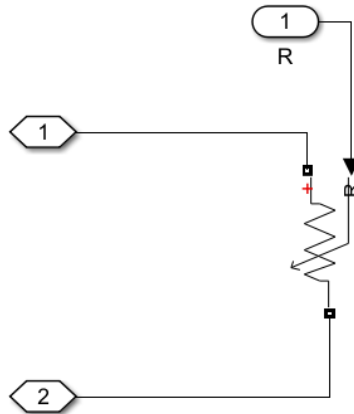
Figura 7.6 Filtro capacitivo no Matlab/Simulink



Fonte: O autor

A.7 AMPOLA

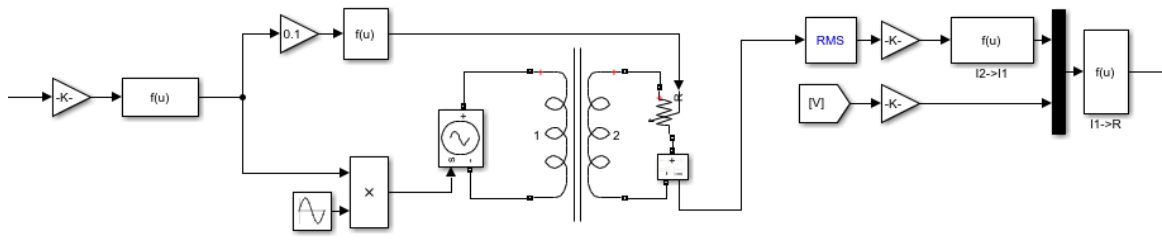
Figura 7.7 Ampola de Raio X no Matlab/Simulink



Fonte: O autor

A.8 CIRCUITO DE FILAMENTO

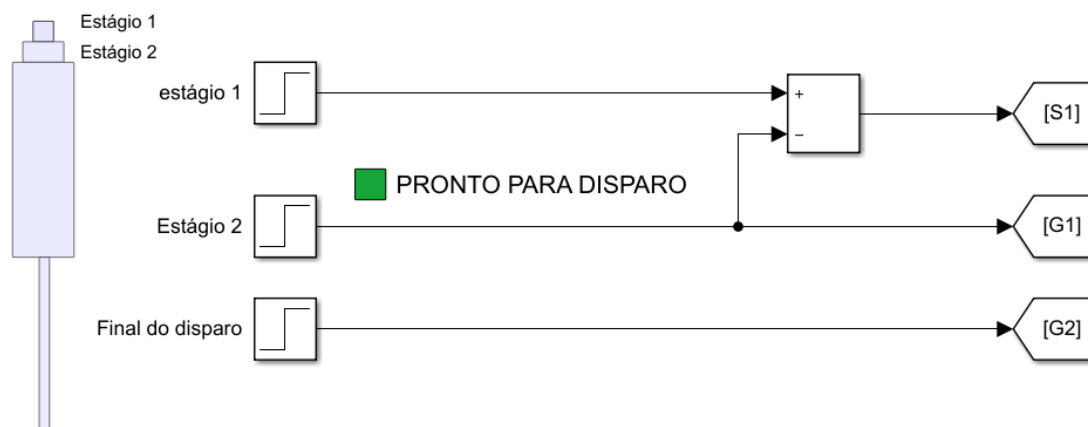
Figura 7.8 Circuito de filamento no Matlab/Simulink



Fonte: O autor

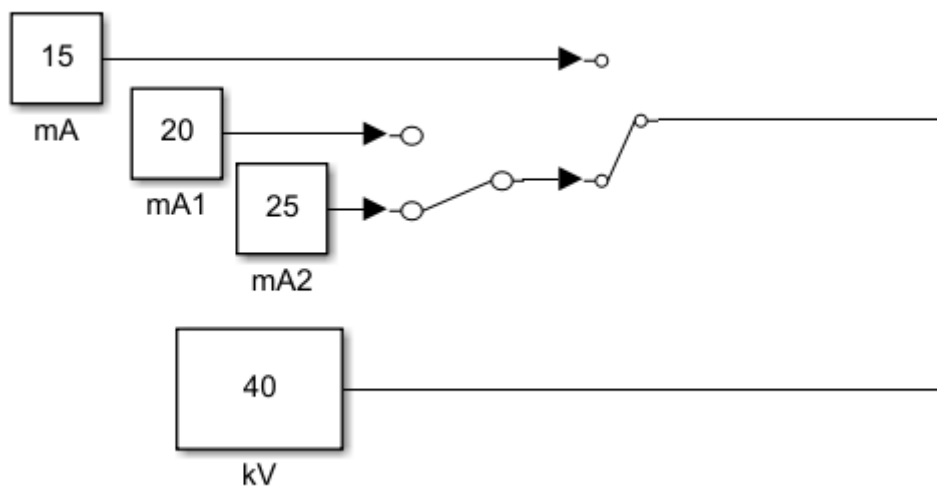
A.9 SINAIS DE ENTRADA PARA CONTROLE

Figura 7.9 Sinais de entrada do disparador



Fonte: O autor

Figura 7.10 Sinais de entrada de corrente e tensão



Fonte: O autor