

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONVERSORES ESTÁTICOS
OPERANDO EM ALTA TENSÃO
APLICADOS EM
FILTRAGEM ELETROSTÁTICA**

Caio Wheden da Costa

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Pedro F. Donoso Garcia, Dr.

Belo Horizonte, 9 de dezembro de 2005

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Sebastião e Marília, e aos meus irmãos Gladstone, Kenya e Marco Aurélio, que são um maravilhoso presente de Deus para a minha vida.

Agradecimentos

Agradeço e louvo ao poderoso Deus e Senhor, pela manifestação de sua infinita bondade e poder em minha vida.

Agradeço aos meus pais, pelo amor e carinho, incentivo, fé e atenção que sempre dedicaram a mim. Aos meus irmãos Gladstone, Kenya e Marco Aurélio pela união e proximidade em todas as horas. À Alessandra, pela presença, apoio e compreensão.

Ao meu orientador Pedro Donoso pela paciência, amizade, confiança e importantes contribuições para este trabalho.

Aos professores Porfírio Cabaleiro Cortizo, Marcos Antônio Severo Mendes e Ivan José da Silva Lopes pela composição da banca examinadora e contribuições para a continuação deste trabalho.

Ao Lênin, cuja presença, conselhos e grande amizade contribuíram enormemente para a conquista deste objetivo.

Aos amigos da ECT, Leonardo Barrouin, Adriano Purri, Luciene e Patrícia, pelas palavras de apoio e incentivo.

Aos amigos Wanderson, Bernardo, Bruno Andrade, Breno, Fabiano e Felipe.

Ao corpo docente do PPGEE.

Resumo

Essa dissertação aborda os princípios de funcionamento do processo de filtragem eletrostática, mostrando as características e vantagens de utilização desta técnica na remoção de poluentes dos gases.

Comparando as geometrias de equipamentos disponíveis para filtragem eletrostática, propõe alterações na estrutura mecânica de um filtro comercial. A mudança proposta visa o sensoriamento da variáveis de tensão e corrente para a implementação de malhas de controle da fonte de alimentação do filtro em alta tensão.

Conversores para alta tensão são apresentados para os estágios ionizador e coletor de partículas do filtro eletrostático. Esta mudança permite atuar de forma independente em cada estágio do filtro, de forma a otimizar a coleta de poluentes suspensos no gás a ser purificado.

Os resultados experimentais obtidos com a utilização dos conversores propostos são apresentados de forma comparativa com os originalmente instalados no precipitador eletrostático em estudo.

Abstract

This work concern to the basic fundamentals and theory of electrostatic precipitation, showing the characteristics and advantages of use of this air cleaning technique.

Comparing the geometries of available equipments, it proposes changes in the mechanical structure of a commercial filter, in order to implement an electronic control system.

A high-voltage controlled converter is presented and proposed separately to both ionization and dust collecting stages. The new converter allows to act independently in the ionization and in the collection control.

The experimental results obtained with the proposed converters are presented comparatively to the original structure find in the electrostatic precipitator in study.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xiv
1 – Introdução	1
1.1 – Estado da Arte	2
1.2 – Objetivos	6
1.3 – Organização do Trabalho	7
2 – O Processo de Filtragem Eletrostática	8
2.1 – Introdução	8
2.2 – Tipos de Filtro Eletrostático	9
2.3 – O Efeito Corona no Processo de Filtragem Eletrostática	11
2.4 – O Processo de Ionização	13
2.5 – Efeitos da Polaridade da Alta Tensão no Efeito Corona	15

2.5.1 – Corona	15
2.5.2 – Geração de Ozônio	17
2.5.3 – Aspecto Visual do Corona	18
2.5.3.1 – Corona positivo	19
2.5.3.2 – Corona negativo	21
2.6 – O Campo Elétrico de Ionização	22
2.7 – O Campo Elétrico para o Coletor de Impurezas	27
2.7.1 – Coletor de Placas Paralelas	28
2.7.2 – Coletor Tubular	30
2.8 – A Mobilidade dos Gases no Processo de Filtragem Eletrostática	31
2.9 – Remoção de Impurezas do coletor	32
2.9 – Conclusões	34
3 – O Filtro Eletrostático em Estudo	35
3.1 – Introdução	35
3.2 – Aspectos Gerais	35
3.3 – Aspectos Mecânicos	36
3.4 – Deficiências de funcionamento do Filtro Original	38
3.5 – Proposta de filtro eletrostático com campos independentes dos estágios ionizador e coletor utilizando conversores de alta tensão	40
3.6 – Conclusões	47
4 – Conversores Estáticos de Alta Tensão Aplicados à Filtragem Eletrostática	48
4.1 – Introdução	48
4.2 – Conversores de Alta Tensão	49
4.2.1 – Fonte de alta tensão de baixa frequência controlada a tiristor	49
4.2.2 – Inversor de Alta Frequência Transistorizado	50
4.2.3 – Inversor de Alta Frequência com Multiplicador de Alta Tensão	52
4.2.4 – Conversor Flyback	54
4.3 – Projeto do Conversor Flyback para a Alimentação do Filtro Eletrostático em Estudo	57
4.3.1 – Função de transferência do conversor flyback	57
4.3.2 – Escolha do transformador	60

4.3.3 – A malha de controle do conversor	60
4.3.3.1 – O controle para o estágio ionizador	61
4.3.3.2 – O controle para o estágio coletor de impurezas	64
4.4 – A medição de alta tensão	71
4.5 – Construção do conversor	70
4.5.1 – Descrição dos Blocos do Circuito Integrado MC44603	71
4.5.1.1 – Oscilador de alta frequência	71
4.5.1.2 – Comparador / Driver (Estágio Ionizador)	73
4.5.1.3 – Controlador / Driver (Estágio Coletor de Impurezas)	74
4.5.1.4 – Circuito de desmagnetização	75
4.6 – Detectores dos pontos críticos de funcionamento do filtro eletrostático	76
4.7 – Conclusões	77
5 – Resultados Experimentais	78
5.1 – Introdução	78
5.2 – Estrutura para os testes	79
5.3 – Os conversores implementados para alta tensão	80
5.4 – Ligação dos conversores estáticos ao filtro eletrostático	84
5.5 – Testes de Filtragem	87
5.5.1 – Filtragem de gordura	87
5.5.2 – Filtragem de fumaça da queima de partículas de café	89
5.5.3 – Filtragem de fumaça da queima de tecido sintético	91
5.6 – Flexibilidade da estrutura mecânica do filtro pelo uso do conversor para estágios separados	91
5.7 – Conclusões do Capítulo	95
6 – Conclusões finais e propostas de continuidade	96
6.1 – Conclusões Finais	96
6.2 – Propostas de Continuidade	98
Anexo A – Conversor para o estágio ionizador	99
A.1 – Diagrama esquemático	100

Anexo B – Conversor para o estágio coletor	101
B.1 – Diagrama esquemático	102
Anexo C – Obtenção da Função de Transferência do Conversor Flyback	103
Anexo D – Estudo do Transformador Flyback	109
D.1 – Cálculo do núcleo do transformador flyback	109
D.2 – Bitolas dos condutores	113
D.3 – Cálculo do entreferro	113
D.4 – Determinação do enrolamento primário	114
D.5 – Determinação do enrolamento secundário	115
Referências Bibliográficas	117

Lista de Figuras

1.1 – Princípio de funcionamento da filtragem eletrostática [2]	2
1.2 – Tamanho de partículas típicas [5]	3
1.3 – Influência do tamanho das partículas no rendimento do filtro em função da velocidade do fluxo de ar [2]	4
1.4 – Influência da velocidade do fluxo de ar no rendimento do filtro [2]	4
2.1 – Tipos Básicos de Filtro Eletrostático [3]	10
2.2 – Relação V-I típica em um ionizador [1]	13
2.3 – Zonas ativa e passiva no processo de ionização [1]	15
2.4 – (a) Carga espacial em torno do eletrodo com alta tensão positiva [4] (b) Distorção do campo elétrico pela carga espacial [4]	16
2.5 – (a) Carga espacial em torno do eletrodo com alta tensão negativa [4]. (b) Distorção do campo elétrico pela carga espacial [4].	17
2.6 – Fotografia longitudinal de um fio sob efeito corona [3]. (a) Corona positiva. (b) Corona negativa.	18
2.7 – Fotografia transversal de um fio sob efeito corona [13]. (a) Corona positiva. (b) Corona negativa.	19
2.8 – Formação do corona positivo [13].	20
2.9 – Formação do corona negativo [13].	21
2.10 – Campo de início da descarga corona para vários gases, em função do diâmetro do fio de ionização.	23

2.11 – (a) Campo radial em um filtro tubular. (b) Campo em um filtro fio-placa. (c) Aproximação radial para o campo do filtro fio placa [3]	25
2.12 – Variação do campo elétrico em torno do fio de ionização em função da distância ao seu eixo central.	26
2.13 – Variação da tensão em torno do fio de ionização em função da distância ao seu eixo central.	27
2.14 – Placas paralelas do estágio coletor de um filtro disponível comercialmente	28
2.15 – Campo uniforme entre as placas paralelas do capacitor [6]	29
2.16 – Campo radial no espaço interno de um capacitor cilíndrico [6]	30
2.17 – A descarga das partículas pelo coletor fica incompleta quando uma camada isolante fica depositada sobre sua superfície, podendo provocar corona reversa [1]	33
3.1 – Dimensões mecânicas do filtro utilizado.	36
3.2 – Ionizador fio-placa	37
3.3 – Estágios (a) ionizador e (b) coletor de um filtro eletrostático comercial	37
3.4 – Grades para (a) retirada de partículas de grandes dimensões e (b) homogeneização do fluxo do ar. (c) ionizador	38
3.5 – Diagrama esquemático dos estágios ionizadores e coletores do filtro em estudo	39
3.6 – (a) Acoplamento dos estágios ionizador e coletor de partículas. (b) Placa com fio ionizador acoplada ao coletor	41
3.7 – Placas do filtro modificadas, mantidas para a utilização na seção coletora e eliminando o acoplamento com o fio ionizador.	42
3.8 – Furação realizada na estrutura do filtro para conter o novo suporte (isolado) do fio ionizador	43
3.9 – Suporte de fenolite elaborado para o fio de ionização	43
3.10 – O suporte do ionizador afixado em suas extremidades	44
3.11 – Fio ionizador preso ao suporte isolado, no ponto central entre cada conjunto de duas placas paralelas	44
3.12 – Fio ionizador ampliado para visualização	45
3.13 – (a) Estágios do filtro original (b) Estágios do filtro após modificação	46
4.1 – Esquema de uma fonte de alimentação de baixa frequência controlada por tiristor [8]	49
4.2 – Fonte com inversor de alta frequência baseado em IGBT e retificador de alta tensão [8]	50

4.3 – Comparação das formas de onda de tensão e corrente de saída do filtro eletrostático utilizando fontes de baixa e de alta frequência [8]	51
4.4 – Fonte com inversor de alta frequência e multiplicador de alta tensão. Saída aplicada a um tubo de Raio-X [9].	53
4.5 – Circuito do conversor flyback [10]. (a) Esquema básico, (b) com modelo equivalente do transformador, (c) durante intervalo 1, (d) durante intervalo 2	55
4.6 – Diagrama da variação da relação de conversão com o ciclo de trabalho	56
4.7 – Onda triangular comparada a VC para originar os pulsos no transistor [11]	58
4.8 – Diagrama de blocos da fonte de alta tensão para o estágio de ionização	62
4.9 – Processo de desmagnetização do transformador Flyback	63
4.10 - Fonte de alta tensão para o estágio coletor de impurezas	64
4.11 – Resistores de óxido metálico para alta tensão	66
4.12 – (a) Ligação série das resistências de medição (b) Isolação externa da associação	67
4.13 – Tubo isolante de silicone utilizado para revestir a associação de resistores	68
4.14 – Tubo de fenolite utilizado para o isolamento elétrico dos resistores	69
4.15 – Fixação do divisor resistivo no circuito impresso do conversor	69
4.16 – Conversor construído para os estágios do filtro eletrostático	70
4.17 – Diagrama do circuito oscilador	72
4.18 – Frequência do oscilador em função de Rref e CT	72
4.19 – Controle PWM pela tensão na entrada de controle	73
4.20 – Variação do ciclo de trabalho com a tensão de controle	74
4.21 – Controle PWM pela corrente de pico no transistor	75
4.22 – Circuito de desmagnetização	76
5.1 – Montagem realizada para os testes de filtragem eletrostática	79
5.2 – (1) Onda dente de serra do oscilador e (2) Geração de pulsos para o acionamento da chave estática	80
5.3 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor (2) Tensão de saída do circuito driver	81
5.4 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor (2) Tensão sobre um resistor série com o enrolamento primário do transformador flyback do estágio ionizador	81
5.6 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor (2) Alta tensão no ionizador do filtro eletrostático	82
5.7 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor para tensão de saída no ionizador de 10kV (2) Alta tensão no ionizador do filtro eletrostático	82

5.8 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor para tensão de saída no coletor de 5kV (2) Tensão sobre um resistor em série com o enrolamento primário do transformador flyback do estágio coletor	83
5.9 – (1) Pulsos para o acionamento do transistor para tensão de saída no coletor de 5kV (2) Alta tensão nas placas coletoras do filtro eletrostático	83
5.10 – Pontos de ionização nas regiões de borda das placas coletoras	84
5.11 – Arco-voltaico no espaço interno das placas coletoras	85
5.12 – Descarga corona visual. (a) Eletrodos em repouso. (b) Eletrodos energizados em alta tensão (12kV).	86
5.13 – Maior intensidade da descarga corona em trecho do fio de ionização. (a) Tamanho normal. (b) Vista ampliada	86
5.14 – Suspensão de partículas de gordura para testes de filtragem eletrostática	88
5.15 – Verificação visual do processo de filtragem eletrostática de partículas de gordura. (a) Conversor de alta tensão desligado. (b) Conversor ligado	89
5.16 – Suspensão de fumaça, devida à queima de café, para testes de filtragem eletrostática	90
5.17 – Verificação visual do processo de filtragem eletrostática de fumaça de queima de café. (a) Conversor de alta tensão desligado (b) Conversor ligado	90
5.18 – Verificação visual do processo de filtragem eletrostática de fumaça de queima de tecido sintético. (a) Conversor original (b) Novos conversores	91
5.19 – Modificação no espaçamento das placas do coletor de partículas. (a) Situação anterior (b) Coletor modificado	92
5.20 – Placas retiradas na modificação do espaçamento no estágio coletor de partículas	93
A.1 – Conversor para o estágio ionizador: Diagrama Esquemático	100
A.2 – Conversor para o estágio coletor: Diagrama Esquemático	102
C.1 – Esquema básico de um conversor flyback [11]	103
C.2 – Crescimento da corrente no enrolamento primário do transformador flyback durante o intervalo T1 [11]	104
C.3 – Representação do estágio de saída do conversor flyback [11]	106
C.4 – Onda triangular comparada a VC para originar os pulsos no transistor [11]	106
D.1 – Parâmetros Ae e Aw de um núcleo EE [11]	113

Lista de Tabelas

2.1: Densidade relativa de alguns gases [4]	22
2-2: Mobilidade de gases carregados a 0°C e 760mmHg (em cm ² /Vs) [4].	31

Nomenclatura

a: Raio do cilindro interno do capacitor cilíndrico.

A: Área superficial das placas do capacitor

A_e : Área da seção transversal do núcleo do transformador.

A_p : Área ocupada pelo enrolamento primário do transformador.

A_w : Área da janela do núcleo do transformador.

b: Raio do cilindro externo do capacitor cilíndrico.

B: Densidade de fluxo magnético.

C: Capacitância do capacitor de placas paralelas.

δ : Entreferro do transformador.

δ_r : Densidade relativa do gás.

d: Distância entre as placas paralelas do capacitor.

D : Relação cíclica de trabalho.

ε : Permissividade absoluta do meio.

ε_0 : Permissividade do vácuo ($8,854187818 \cdot 10^{12} F / m$).

ε_r : Permissividade relativa ou constante dielétrica do material (1,0006 para o ar).

E : Intensidade do campo elétrico.

E_s : Campo elétrico para o início da descarga corona.

f: Frequência de chaveamento do conversor.

H : Intensidade de campo magnético.

I_1 : Corrente no enrolamento primário.

I_{1md} : Corrente média no enrolamento primário.

I_2 : Corrente no enrolamento secundário.
 I_{2md} : Corrente média no enrolamento secundário.
 I_p : Pico do valor da onda de corrente.
 I_{pef} : Valor eficaz da corrente no primário.
 J : densidade de corrente no condutor.
 K : Mobilidade do gás.
 K_p : Fator de utilização de cada camada do enrolamento primário do transformador.
 K_w : Fator de utilização da área do enrolamento do transformador.
 $M(D)$: Relação entre as tensões contínuas de saída e de entrada do conversor.
 μ_0 : Permeabilidade do vácuo ($4\pi 10^{-7}$ H/m).
 n : Relação de espiras entre enrolamentos do transformador flyback.
 N_p : Número de espiras do primário do transformador.
 N_s : Número de espiras do secundário do transformador.
 η : Rendimento da fonte.
 P_{out} : Potência de saída
 P_{in} : Potência de entrada.
 r : Distância ao centro do eixo do condutor de ionização.
 R_1 : Raio da seção do condutor de ionização.
 R_2 : Menor distância do fio à placa adjacente.
 T : Período de um sinal.
 T_1 : Intervalo ligado da chave estática em um ciclo.
 T_2 : Intervalo desligado da chave estática em um ciclo.
 T_3 : Período morto.
 u : Velocidade média de deslocamento da partícula na direção do campo elétrico.
 V : Volume do entreferro.
 V_C : Tensão para controle da largura dos pulsos de chaveamento.
 V_{in} : Tensão contínua na entrada do conversor.
 V_s : Tensão para o início da descarga corona
 V_{out} : Tensão de saída do conversor.
 ω_p : Frequência do pólo na função de transferência $G(j\omega)$
 ω_z : Frequência do zero na função de transferência $G(j\omega)$
 ΔW : Energia armazenada na indutância do enrolamento primário do transformador

Capítulo 1

Introdução

O ar é um dos elementos do ecossistema que tem sofrido grandes agressões de poluentes oriundos das atividades do homem, principalmente nas aglomerações urbanas. Enormes ataques contra a natureza têm sido verificados ao longo dos últimos anos, impactando fortemente o ar que respiramos e a camada de ozônio, que filtra os raios ultravioleta.

Neste contexto, existe uma tendência mundial de zelar pela saúde do planeta e, em consequência, pela do próprio homem. Desenvolvimento sustentado e exploração racional são termos cada vez mais próximos da nossa realidade e que traduzem bem essa tendência. Embora não se encontre ainda em um estágio avançado, a mobilização por parte da sociedade e do governo de alguns países em defesa do meio ambiente já é uma realidade.

O controle das emissões atmosféricas, bem como a preservação da qualidade do ar em áreas urbanas é uma necessidade cada vez premente, uma vez que afeta a qualidade de vida das populações e o meio ambiente como um todo.

Vários têm sido os esforços e medidas no sentido minimizar o problema da poluição. Equipamentos variados estão disponíveis com este fim. Uma solução cada

vez mais difundida, e que tem posição de destaque, é a utilização da filtragem eletrostática.

1.1 – Estado da Arte

O processo de filtragem eletrostática é aquele em que a separação de partículas dos gases é baseada em meios elétricos [1]. O equipamento que realiza tal separação é conhecido como filtro eletrostático.

O princípio básico consiste em fazer o gás com poluentes passar através de uma unidade de ionização, composta por eletrodos energizados em alta tensão, instalados entre placas devidamente aterradas, onde as partículas em suspensão ficam eletricamente carregadas e são direcionadas para a unidade coletora.

No estágio coletor, pela aplicação de campo elétrico, as partículas de poluentes são atraídas e depositadas em placas apropriadas para a retenção de sujeira, deixando de viajar pelo gás, que fica mais puro. A Figura 1.1 ilustra o princípio de funcionamento do processo de filtragem eletrostática.

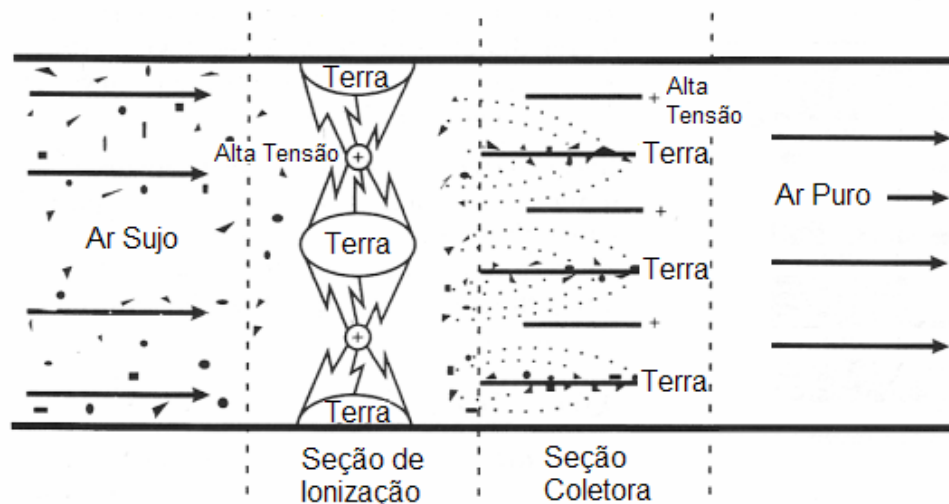


Figura 1.1: Princípio de funcionamento da filtragem eletrostática [2]

A capacidade do filtro de remover sujeira do fluxo de ar depende de uma variedade de fatores, como [2]:

- Tamanho das partículas dos poluentes: Partículas maiores provocam menor rendimento pela maior inércia que possuem, em função da velocidade do ar, prejudicando a sua atração pelas placas coletoras. Partículas muito pequenas, de outro lado, estão de tal modo atraídas às moléculas de gás que podem não sofrer efeito do filtro. A Figura 1.2 esboça o tamanho de partículas típicas encontradas na atmosfera e a Figura 1.3 esboça a influência do tamanho de algumas partículas na eficiência do processo de filtragem.

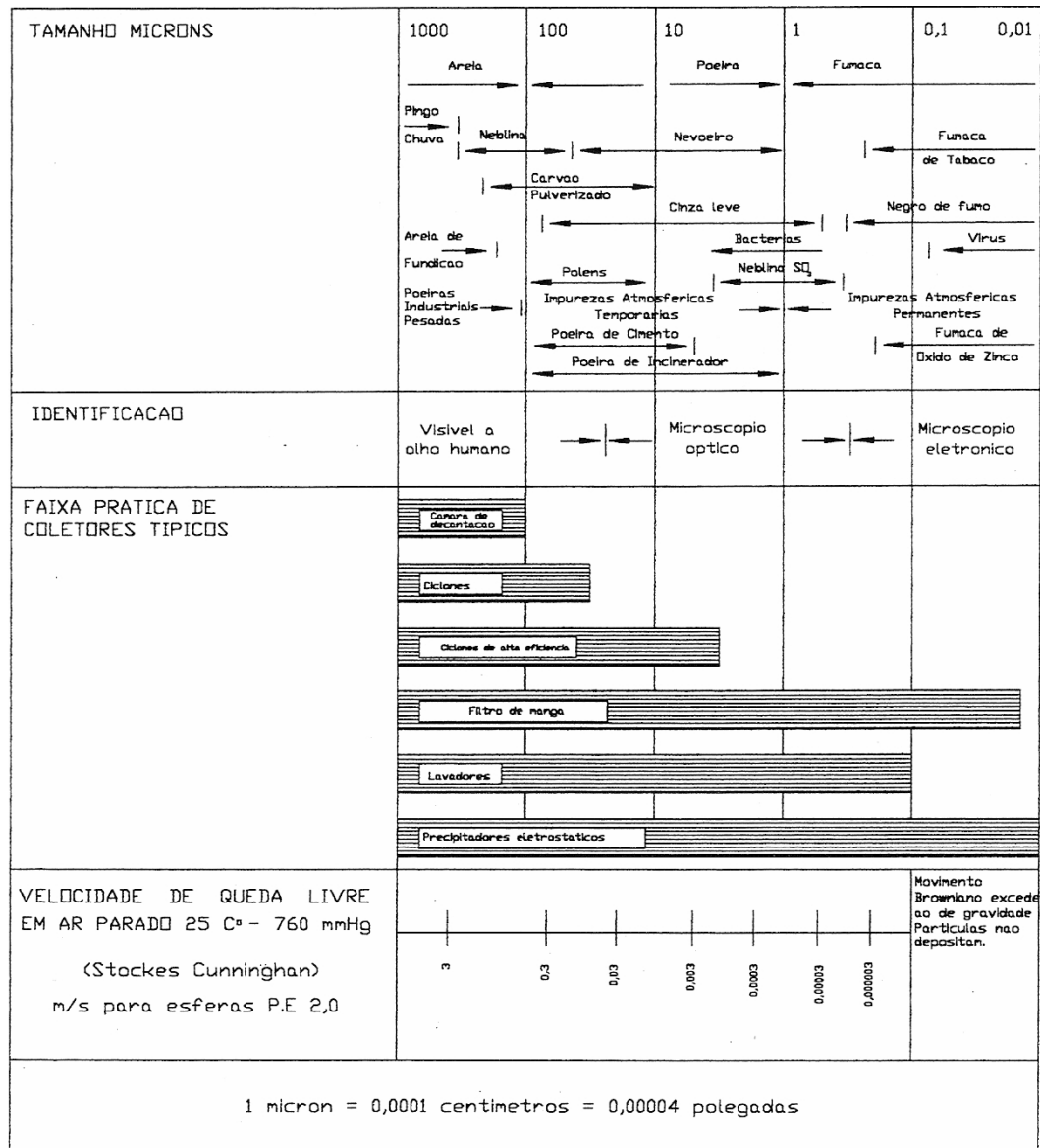


Figura 1.2: Tamanho de partículas típicas [5].

- Velocidade e uniformidade do fluxo de ar: Quanto menor a velocidade do fluxo de ar através do estágio coletor, maior o tempo e a chance para a atração e retenção das partículas de poluentes pelas placas coletoras. A figura 1.4 mostra a influência da velocidade do fluxo de ar no processo de filtração.

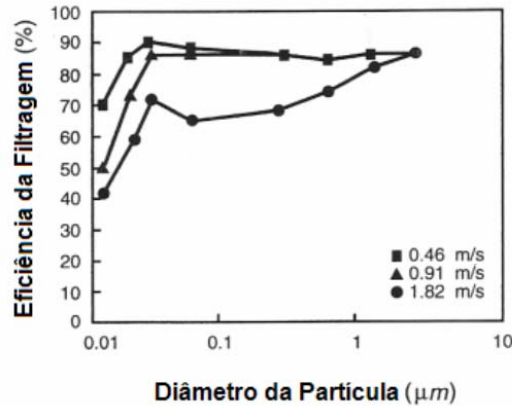


Figura 1.3: Influência do tamanho das partículas no rendimento do filtro, em função da velocidade do fluxo de ar [2].

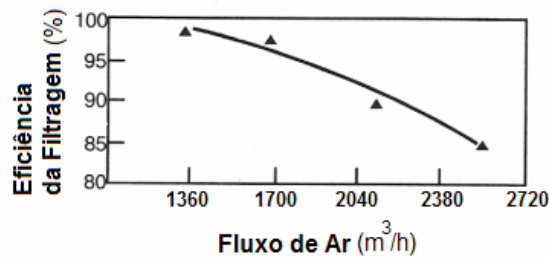


Figura 1.4: Influência da velocidade do fluxo de ar no rendimento do filtro [2].

- Espaçamento entre os eletrodos do estágio ionizador: É importante garantir uma carga adequada às partículas que passam pela seção de ionização, o que depende inversamente da distância entre os eletrodos deste estágio. A alta intensidade do campo ionizante leva à expressiva geração de ozônio. Se o campo for pouco intenso, a carga das partículas não fica completa, prejudicando o processo.
- Espaçamento entre as placas do estágio coletor: A redução da distância entre as placas coletoras melhora o processo de deflexão das partículas de poluentes e a eficiência de filtração. Todavia, tal espaçamento reduzido dificulta a

manutenção e a limpeza do equipamento, o que também deve ser analisado no projeto do filtro.

- Tensão elétrica aplicada aos estágios coletor e ionizador: Tensões elétricas elevadas nos estágios do filtro podem acarretar em formação desnecessária de ozônio. Tensões reduzidas resultam em baixa eficiência no processo de filtração. O valor adequado deve ser então estabelecido, conforme a geometria do equipamento.

Dispondo de eletrodos alimentados em alta tensão, os filtros eletrostáticos não são recomendados em algumas aplicações, tais como aquelas em que o gás apresenta alta umidade e em sistemas que trabalham com gases explosivos.

A passagem uniforme do fluxo de ar pelos estágios do filtro é uma condição importante para o seu bom funcionamento. Para garantir este quesito e também impedir a passagem de impurezas de dimensões maiores pelos estágios do filtro, um arranjo mecânico conhecido como pré-filtro é instalado na entrada do equipamento.

A limpeza do filtro eletrostático deve ser realizada de forma periódica. Dependendo do tipo de poluente, os filtros podem necessitar ser lavados em soluções cujo solvente retira o acúmulo de sujeira impregnada nas placas coletoras. Outros, como partículas de carvão, podem ser limpos pela aplicação de jatos de ar ou água. A manutenção regular no filtro é necessária para garantir a sua conservação em boas condições de funcionamento.

Os filtros eletrostáticos apresentam, em relação aos filtros mecânicos comerciais, a vantagem de operar sobre uma ampla faixa de tamanho de partículas (conforme mostrado pela Figura 1.2) e apresentar pouca perda de pressão do fluxo de ar. Podem ser projetados para a eficiência desejada (frequentemente superior a 93% a 99%). A durabilidade do equipamento é outro diferencial, podendo superar os 20 anos [1].

1.2 – Objetivos

Apesar de sua versatilidade, a eficiência do filtro fica bastante prejudicada à medida que as placas coletoras ficam impregnadas de poluentes. Nesta situação, as fontes de alta tensão utilizadas, sem mecanismos de controle adequados e diante do aumento do consumo de energia no equipamento, não conseguem manter o valor nominal da saída.

A deposição de resíduos causa uma redução gradativa do canal entre as placas do estágio coletor, possibilitando a geração de arco elétrico entre as mesmas caso o campo elétrico entre as placas não seja controlado.

A ausência de controle nas tensões nos estágios ionizadores e coletores comprometem a utilização da filtragem eletrostática em algumas aplicações. Tensões elevadas provocam a formação de ozônio, nocivo à saúde humana, tornando o equipamento impróprio para a purificação de ar em ambientes fechados. De outro lado, a redução da tensão reduz a eficiência do filtro, em função do tamanho das partículas de impureza e da velocidade do ar.

Diante destes problemas encontrados nos filtros comerciais disponíveis, o que se propõe é construir um conversor controlado que proporcione a filtragem desejada ao longo de tempo de operação do filtro, ajustando às suas condições de carga.

Dispondo de um controle para variar as tensões de ionização e de coleta de partículas, será ainda possível realizar testes nos filtros para operação em ambientes onde a utilização deste filtro não é ainda empregada.

1.3 – Organização do trabalho

A dissertação foi desenvolvida em cinco capítulos, organizada de forma a relacionar as referências da área pesquisada, desenvolvendo um estudo do equipamento disponível comercialmente e apresentando a implementação do presente trabalho, destacando as vantagens de sua utilização.

O Capítulo 2 apresenta as bases de funcionamento do processo de filtragem eletrostática, com análise das equações do campo elétrico e da geometria dos filtros.

O Capítulo 3 apresenta as especificações e detalhes de funcionamento do filtro eletrostático escolhido para o trabalho. Apresenta ainda, uma proposta de alteração mecânica do filtro estudado, visando otimização do equipamento.

O Capítulo 4 discute as topologias dos conversores para alta tensão e aborda as formas de controle adequadas às necessidades do processo de filtragem eletrostática.

O Capítulo 5 apresenta os resultados encontrados no sistema de filtragem eletrostático, utilizando tanto o equipamento comercial original, como o alterado pela proposta do presente trabalho.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, bem como descreve as propostas de continuidade e as contribuições alcançadas.

Capítulo 2

O Processo de Filtragem Eletrostática: Princípio de Funcionamento

2.1 – Introdução

O princípio básico da filtragem eletrostática consiste em fazer com que o gás a ser purificado flua através de um campo elétrico intenso, onde as partículas de poluentes adquirem carga elétrica. As partículas carregadas são então atraídas, também pela ação de um campo elétrico, para os eletrodos coletores, devidamente preparados para reter determinado tipo de impureza.

O bom funcionamento do filtro eletrostático depende tanto de características elétricas quanto mecânicas do equipamento. O presente trabalho aborda as questões elétricas, assumindo como satisfeitas as seguintes condições mecânicas:

- A distribuição do fluxo de gás pelos estágios do filtro é uniforme.
- O fluxo (ou vazão de gás) é mantido constante pelo sistema de circulação forçada de ar.
- Os pré-filtros impedem a passagem de impurezas de grandes dimensões.

As aplicações da filtragem eletrostática possuem grande diversidade, nos âmbitos industrial, comercial e mesmo o residencial. De acordo com a finalidade do filtro, vários tamanhos e modelos estão disponíveis.

Apesar da variedade de tipos e aplicações destes filtros, os processos elétricos envolvidos apresentam características comuns a todos eles. Então, apesar desta pesquisa se concentrar em um equipamento específico, a abordagem que segue pode ser ampliada para outros equipamentos baseados na filtragem eletrostática.

O filtro escolhido para o trabalho, abordado ao longo do texto, é um equipamento comercial com aplicações para a retirada de gordura e fumaça do ar. A menos que mencionado o contrário, as especificações e comentários que seguem, dizem respeito a este modelo de filtro.

2.2 – Tipos do Filtro Eletrostático

O princípio básico de operação do filtro eletrostático envolve cinco operações fundamentais [1]:

- Ionização.
- O carregamento eletrostático das partículas de poluentes.
- Deflexão das partículas pela ação de campo elétrico.
- Deposição dos poluentes.
- Remoção dos poluentes.

Os processos envolvidos na filtragem eletrostática podem ser realizados em conjunto (nos filtros de estágio único) ou separadamente (as duas primeiras operações ocorrem em um estágio, e as outras três no estágio seguinte).

Os arranjos comuns de eletrodos correspondentes a estes dois tipos básicos de filtro eletrostático são mostrados na Figura 2.1.

A Figura 2.1-a mostra um filtro do tipo tubular, em estágio único, no qual um forte campo elétrico é mantido entre o centro (fio corona no eixo central) e as paredes do tubo de filtragem, por onde flui o gás a ser purificado. Em decorrência do corona no fio central, as partículas de gás transportando poluentes ficam carregadas e são atraídas pelo campo elétrico interno para as paredes do tubo, onde são coletadas.

A Figura 2.1-b esboça um filtro de placas planas paralelas, também em estágio único. Eletrodos em forma de fios são instalados de forma transversal à passagem do gás, entre as placas planas paralelas. As partículas de gás transportando poluentes são carregadas pelo corona no fio e então atraídas para as placas (pelo campo elétrico presente entre o fio corona e os eletrodos do coletor).

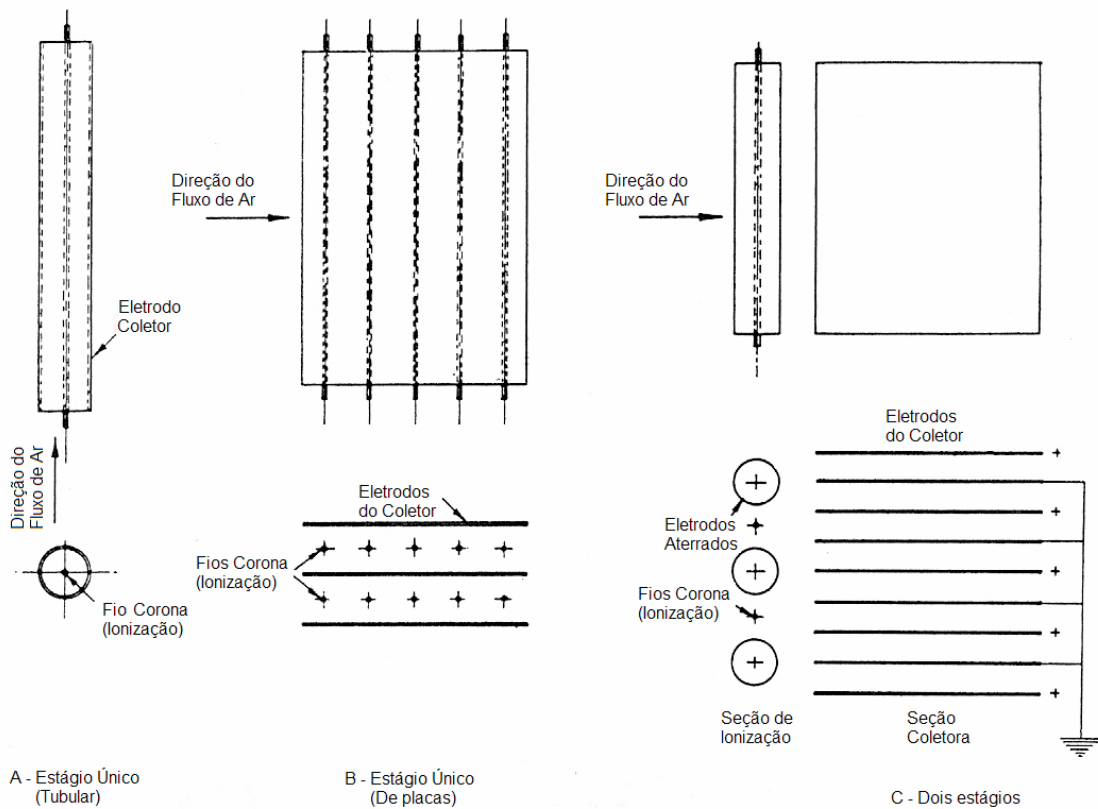


Figura 2.1: Tipos Básicos de Filtro Eletrostático [3].

Finalmente, na Figura 2.1-c, vemos o esquema de um filtro em dois estágios. As partículas de gás transportando poluentes são ionizadas pelo efeito corona no primeiro estágio (seção de ionização), ao passar de forma transversal no espaço entre os fios e as placas planas paralelas. No estágio seguinte (coletor), o campo elétrico entre as placas planas paralelas atrai as partículas de impurezas (eletricamente carregadas) para a superfície destas placas, onde os poluentes ficam retidos e são retirados.

O campo elétrico intenso necessário para fornecer a descarga corona no fio ionizador leva à quebra de moléculas de oxigênio e à formação de ozônio (O_3), o que é proibitivo em determinadas aplicações. O filtro de dois estágios, mostrado na Figura 2.1-c, tem a vantagem de permitir o controle da ionização e conseqüente formação de ozônio sem afetar o estágio de coleta de impurezas.

Os equipamentos de dois estágios vêm ganhando importância em aplicações comerciais e residenciais, sobretudo aquelas para a purificação do ar ambiente, onde a geração de ozônio deve ser minimizada.

Outro ponto de interesse para o filtro de dois estágios é que, conforme será mostrado mais adiante, as características do campo elétrico necessário para ionizar o gás são diferentes daquelas do campo para atrair as impurezas até os eletrodos coletores. Por este motivo, o controle independente destes campos, que não pode ser realizado nos equipamentos de estágio único, torna o filtro mais eficaz na coleta de partículas.

2.3 – O Efeito Corona no Processo de Filtragem Eletrostática

Um dos requisitos para o funcionamento da filtragem eletrostática é que as partículas de gás que transportam os poluentes sejam ionizadas antes de passar pelos coletores. Essa ionização depende da formação de corona em torno dos eletrodos do

ionizador. O corona, por sua vez, para ocorrer, necessita que sejam satisfeitas algumas condições além da aplicação de alta tensão entre arranjos de eletrodos.

Quando aplicamos uma diferença de potencial entre um par de placas paralelas (próximas em relação a suas dimensões), produzimos um campo elétrico uniforme no gás entre elas, expresso pelo gradiente de tensão entre as placas. Se a tensão entre placas for gradativamente elevada, percebe-se que quando este gradiente de tensão atinge um valor crítico (em torno de 30kV/cm para o ar puro), ocorre a ruptura elétrica do gás e conseqüente arco elétrico entre as placas, sem formação de corona.

Um campo elétrico uniforme não permite então, a formação de corona. O arranjo de placas paralelas será útil no segundo estágio do processo de filtragem, onde o campo uniforme entre as placas será usado na deflexão das partículas carregadas de gás com poluentes para as placas coletoras.

Dessa análise decorre que a formação de corona depende da geometria dos eletrodos, devendo-se observar determinadas condições para obtê-la.

Aplicando uma diferença de potencial apropriada entre um fio e uma placa (ou entre um fio e um tubo) devidamente espaçados, por sua vez, a distribuição do campo no espaço entre eletrodos não é uniforme. O campo elétrico varia de um alto valor nas proximidades do fio para um valor bem menor na superfície da placa (ou do tubo, dependendo da geometria de filtro utilizada).

Com um valor adequado da tensão aplicada entre estes últimos tipos de eletrodos, devidamente espaçados de forma a obtermos um campo elétrico muito intenso apenas nas proximidades do fio, provocamos a ruptura elétrica do gás nestas regiões. Às vezes caracterizada pela emissão de luz, essa ruptura elétrica do gás nas vizinhanças do fio constitui o efeito corona, fenômeno necessário ao funcionamento do filtro eletrostático.

Continuando a aumentar a intensidade do campo elétrico, podemos chegar à ruptura elétrica completa do gás entre os eletrodos, com a geração do arco-elétrico, cuja avalanche de elétrons coloca os eletrodos sob curto-circuito, que é totalmente indesejável na operação do filtro eletrostático.

Para a alta eficácia da filtragem, devemos obter uma formação estável de corona, evitando a ocorrência de arco-elétrico entre os eletrodos.

2.4 – O Processo de Ionização

Como descrito na seção anterior, a formação de corona é indispensável para a ionização do gás no filtro eletrostático. O comportamento da tensão aplicada no ionizador e da corrente depende das condições de descarga.

Conforme mostrado na Figura 2.2, aumentando desde zero a tensão aplicada entre eletrodos ionizadores, verificamos que a corrente que flui entre estes é desprezível até determinado ponto, quando é alcançada a tensão de início de corona, e a corrente começa a crescer. Além deste ponto, novos aumentos na tensão implicam em aumento na corrente até que seja atingida a ruptura do gás, com a ocorrência de arco-elétrico.

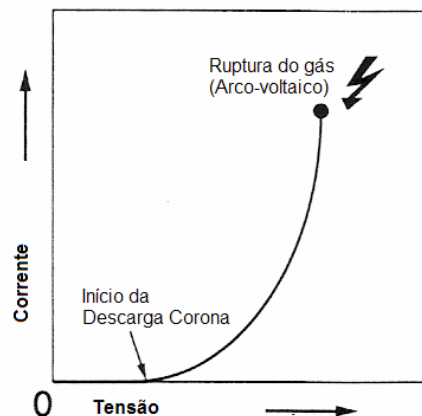


Figura 2.2: Relação V-I típica em um ionizador [1].

A tensão para início de corona, na faixa dos quilovolts, varia com o diâmetro do fio ionizador, com a densidade relativa do gás que o circunda e com a polaridade da tensão aplicada.

O processo de ionização dos gases é ilustrado na Figura 2.3 e explicado a seguir. Os gases têm um número elevado de moléculas neutras por unidade de volume (usualmente em torno de 10^{19} moléculas/cm³). Pela ação da radioatividade natural e da radiação cósmica, algumas dessas moléculas se tornam ionizadas e recombina-se em seguida. Na presença de um campo elétrico durante a ionização, um elétron será acelerado e separado da molécula em que estava (deixando um íon positivo), e se chocará em uma curta distância com um elétron de outra molécula. Esse choque libera um elétron adicional e gera outro íon positivo, num processo de avalanche nas regiões onde o campo elétrico é intenso suficiente para trazer os elétrons aos níveis de ionização.

Os íons que se recombina e as moléculas altamente ativas emitem fótons, gerando um brilho característico do corona. Esse processo de ionização ocorre apenas nas regiões onde o campo elétrico é muito intenso, chamada de *zona ativa*. Entre um fio e uma placa plana (ou entre um fio e um tubo), temos que a zona ativa é aquela restrita à vizinhança do fio, pela maior intensidade do campo.

Quando os elétrons em movimento entram na região de menor intensidade de campo, denominada de *zona passiva*, estes não são capazes de ionizar novas moléculas. Em vez disso, eles se anexam às moléculas ali presentes, formando íons de gás negativos.

Os elétrons se anexam apenas a moléculas de gás eletronegativas (como O₂, SO₂, Cl₂). A explicação é que estes átomos ou moléculas em seu estado gasoso podem com facilidade adquirir um elétron livre para formar um íon negativo estável. Os gases, atômicos ou moleculares que tem esta tendência são aqueles que faltam um ou dois elétrons para completar a última camada eletrônica (como é o caso do oxigênio).

A Figura 2-3 mostra um esboço das *zonas ativa e passiva* de ionização, supondo alimentação com alta tensão negativa. A discussão sobre os efeitos da polaridade no corona será feita adiante. A zona ativa é apenas uma parcela do conjunto, de modo que a ionização das partículas do gás ocorre quase que completamente na zona passiva.

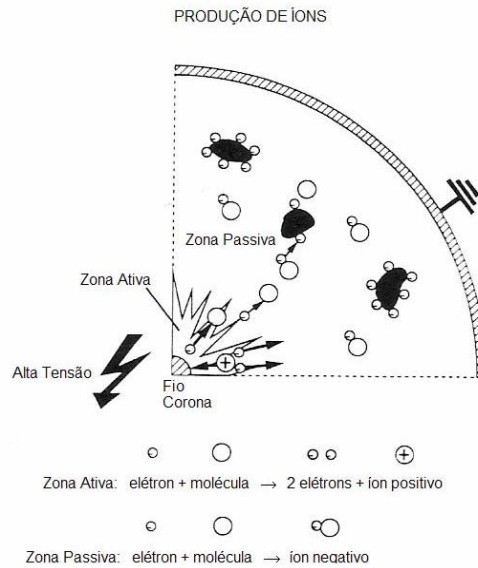


Figura 2.3: Zonas ativa e passiva no processo de ionização [1].

2.5 – Efeitos da Polaridade da Alta Tensão no Efeito Corona

O comportamento da descarga corona muda com a polaridade da tensão aplicada. Os principais aspectos da aplicação de alta tensão positiva ou negativa no processo de filtragem eletrostática são apresentados a seguir, de forma comparativa.

2.5.1 – Corona

A polaridade negativa (comparada às mesmas condições com a positiva) pode ser operada a tensões mais altas sem a ocorrência de arco-elétrico. Isso decorre da distorção

no campo elétrico original provocada pelo processo de ionização, cuja distribuição de carga em torno do fio corona depende da polaridade da tensão aplicada.

A Figura 2.4-a ilustra o caso da descarga corona positiva [4]. A ionização por colisão de elétrons ocorre nas regiões de alta intensidade de campo, próximas à ponta do eletrodo com alta tensão. Pela alta mobilidade dos elétrons, estes prontamente se deslocam para o anodo, deixando atrás uma carga espacial positiva. Tal carga espacial resulta na redução do campo originalmente presente nas regiões muito próximas ao anodo e, ao mesmo tempo, no aumento do campo nas regiões onde ficou a carga espacial. Tal distorção de campo é ilustrada pela Figura 2.4-b. A curva tracejada representa a distribuição de campo original. A curva contínua esboça a distribuição de campo distorcida.

A intensidade do campo no topo da distribuição de carga pode ser tornar alta e suficiente para iniciar um fluxo direto de elétrons com o catodo, que pode subsequentemente levar à completa ruptura do gás.

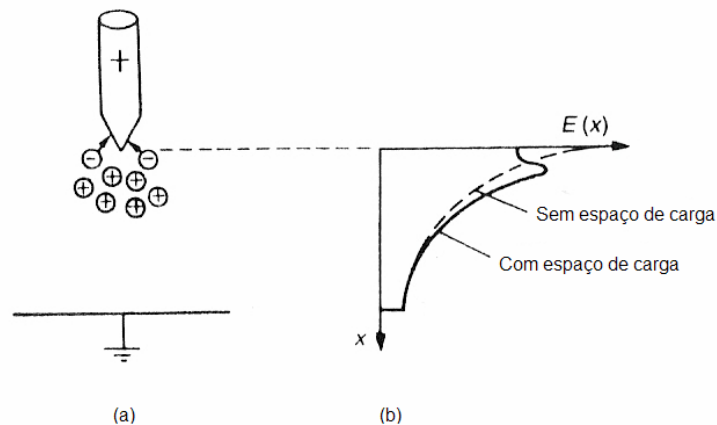


Figura 2.4: (a) Carga espacial em torno do eletrodo com alta tensão positiva.
(b) Distorção do campo elétrico pela carga espacial.

A Figura 2.5-a ilustra o caso da descarga corona negativa [4]. A ponta com alta tensão (catodo) repele os elétrons para a região de menor intensidade de campo. Estes elétrons se anexam às moléculas de gás eletronegativas, formando uma região de íons negativos nas regiões próximas ao anodo e uma carga espacial positiva nas proximidades

do catodo. O campo elétrico fica bastante ampliado nas regiões muito próximas à ponta negativa, mas a região de ionização é drasticamente reduzida, conforme ilustrado na Figura 2.5-b, tendendo a eliminar a ionização. Uma vez que a ionização cessa, o campo elétrico afasta a carga espacial da vizinhança da ponta de alta tensão e o ciclo se repete.

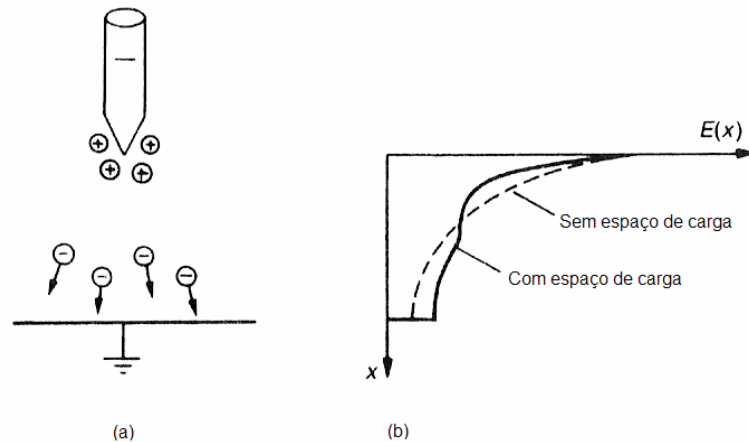


Figura 2.5: (a) Carga espacial em torno do eletrodo com alta tensão negativa. (b) Distorção do campo elétrico pela carga espacial.

A redução do campo elétrico nas proximidades da ponta de alta tensão, provocada pela carga espacial do corona negativo, faz com que a tensão de ruptura do gás seja maior para corona negativo do que com positivo.

2.5.2 – Geração de Ozônio

As diferenças no mecanismo de geração da descarga corona fazem com que, para uma mesma tensão aplicada, a quantidade de ozônio produzido seja muito maior na corona negativa do que na positiva [3].

Dependendo da aplicação, a geração de ozônio pode não representar um problema. Em purificadores de ar ambiente, contudo, é normalmente desejável manter a quantidade produzida de O_3 em níveis mínimos, e a aplicação da descarga corona positiva é mais recomendada.

2.5.3 – Aspecto visual do corona

O aspecto visual do corona também sofre a influência da polaridade. O brilho obtido na utilização da corona positiva é totalmente diferente daquela com polaridade negativa. Com tensão positiva, a corona aparece com uma envoltura uniforme sobre toda a superfície do fio. Com a polaridade negativa, o corona aparece como pontos luminosos espaçados, distribuídos ao longo do fio [3].

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram a diferença no aspecto visual do corona positivo e negativo. Por causa dos mecanismos e propriedades distintas do corona positivo e negativo, estes serão abordadas separadamente.

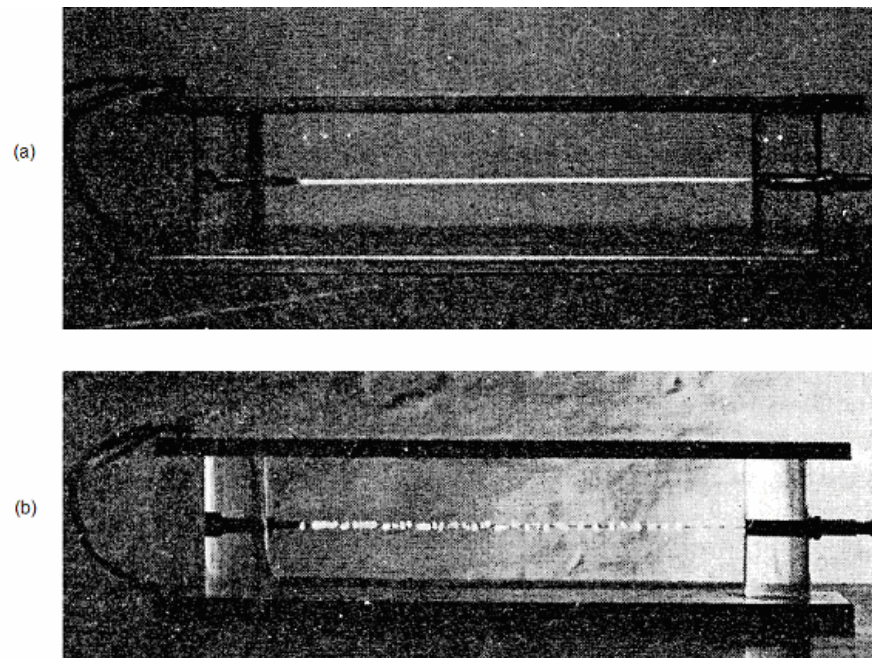


Figura 2.6: Fotografia longitudinal de um fio sob efeito corona [3].

(a) Corona positiva. (b) Corona negativa.

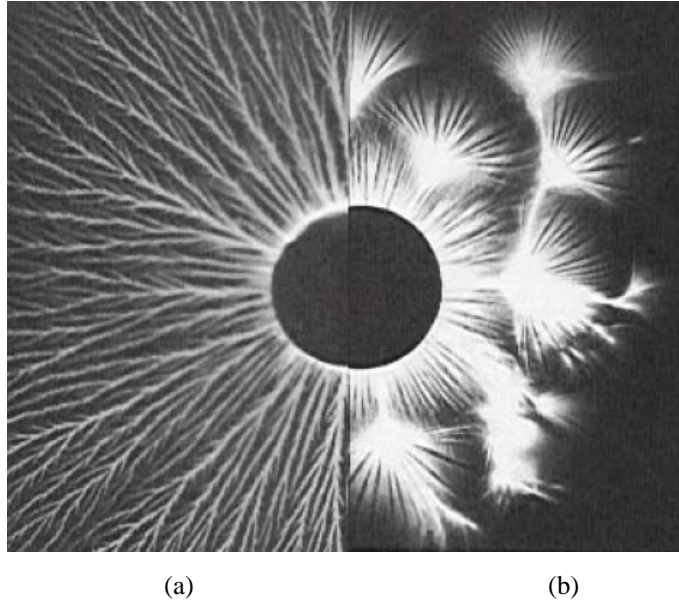


Figura 2.7: Fotografia transversal de um fio sob efeito corona [13].
(a) Corona positiva. (b) Corona negativa.

2.5.3.1 – Corona positivo

Elevando a diferença de potencial entre os eletrodos, após alcançar a tensão necessária ao início da ionização, temos uma região em torno do anodo onde o campo é forte o bastante para ionizá-la por colisão de elétrons. A Figura 2.8 mostra a formação do corona positivo.

Um elétron livre, ao ser conduzido pelo campo na direção do anodo, produz uma avalanche de elétrons. A densa nuvem de íons positivos produzidos na cabeça (parte frontal) da avalanche, mais próxima ao anodo, pela presença da carga espacial descrita na seção 2.5.1, forma uma eventual extensão da região de ionização, que equivale a uma extensão do anodo.

As avalanches secundárias são então geradas na direção do anodo e também das nuvens de íons positivos. Se as condições forem favoráveis, o intenso campo elétrico em torno do anodo pode levar à formação de “correntezas” (fluxos contínuos) de íons divergindo em torno do anodo.

Caso a tensão entre os eletrodos seja ainda mais elevada, pode-se levar à formação de uma nuvem de íons negativos nas vizinhanças do anodo e, muito próximo à sua superfície, pequenas e numerosas rajadas de íons (curtas em comprimento, sobrepostas e simultâneas), cuja descarga se apresenta como um brilho que cobre significativamente a superfície do condutor de alta tensão.

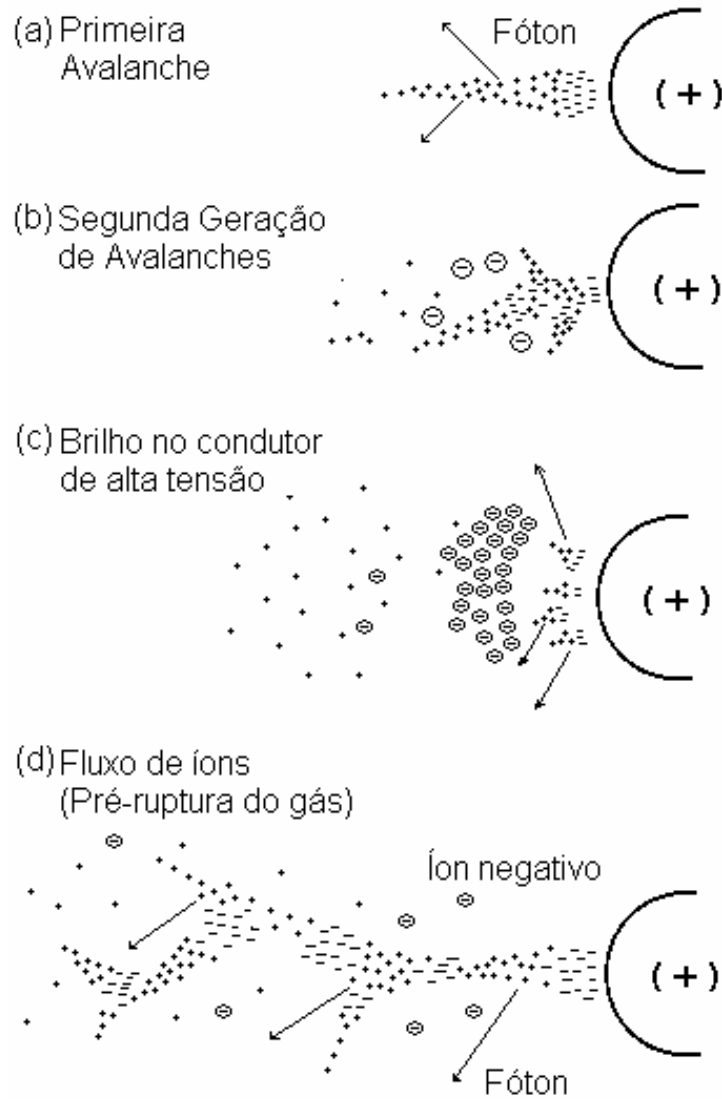


Figura 2.8: Formação do corona positivo [13].

2.5.3.2 – Corona negativo

Elevando a diferença de potencial entre os eletrodos, após alcançar a tensão necessária ao início da ionização, o corona assume um modo pulsante conhecido como pulso de Trichel. Cada pulso de corrente corresponde a uma avalanche de elétrons mãe ocorrendo na zona de ionização. A zona de ionização se estende desde a superfície do catodo e se torna fraca à medida que se afasta do mesmo, até o ponto onde a ionização por colisão é compensada pela anexação de elétrons.

A partir deste ponto, avalanches de elétrons adicionais vão se anexar às moléculas do gás e formar íons negativos que vão se deslocando lentamente para longe do catodo. Durante o processo do crescimento das avalanches, fótons são irradiados do núcleo da avalanche em todas as direções, cuja energia pode gerar avalanches secundárias. O movimento dos elétrons e dos íons negativos para longe do catodo, e de íons positivos para o catodo correspondem aos pulsos de corrente corona que circulam no circuito de alta tensão. A Figura 2.9 mostra a formação do corona negativo.

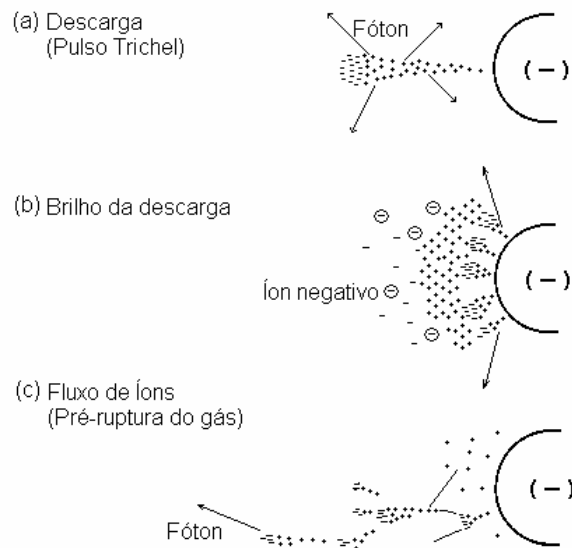


Figura 2.9: Formação do corona negativo [13].

2.6 – O campo elétrico de ionização

O campo elétrico necessário para iniciar um processo contínuo de ionização depende, além da energia de ionização do gás que atravessa o filtro, do caminho médio livre entre colisões das moléculas, que por sua vez, é função da densidade do gás.

Outro fator que afeta a ionização é a curvatura do fio corona a ser utilizado, que determina o grau da não homogeneidade do campo elétrico.

Apesar da não existência de uma descrição teórica pura, pela complexidade da análise de mistura dos gases, Peek propôs uma relação semi-empírica, que expressa o campo de início de corona E_0 em função da densidade relativa do gás “ δ_r ”, do raio do fio ionizador “ r ” e de duas constantes empíricas, “ A ” e “ B ”.

$$E_0 = A\delta + B\sqrt{\frac{\delta_r}{r}} \quad (2-1)$$

Os valores recomendados para as constantes “ A ” e “ B ”, em condições típicas de operação do filtro, são:

$$A = 3,2 \cdot 10^6 \text{ V/m}, \quad B = 9 \cdot 10^6 \text{ V/m}^{1/2}$$

A Tabela 2-1 mostra a densidade absoluta e relativa de alguns gases (em relação à densidade do ar).

Tabela 2.1: Densidade relativa de alguns gases [4]

Substância	Densidade (Kg/m ³)	Densidade relativa (δ_r)
Ar	1,226	1
O ₂	1,355	1,105
CO ₂	1,874	1,528
SO ₂	2,776	2,264

A variação do campo de início da ionização com o diâmetro do fio é mostrada para alguns gases na Figura 2.10. Pode ser visto que, em geral, quanto maior o valor do raio do fio de ionização, menor o campo elétrico necessário para iniciar a descarga corona.

Para um condutor de 0,25mm de diâmetro (0,125mm de raio), pela expressão 2-1 e conforme pode ser observado na Figura 2.10 (interseção das linhas contínuas nas coordenadas mencionadas), encontramos que o campo para iniciação da descarga corona é de 112,5kV/cm.

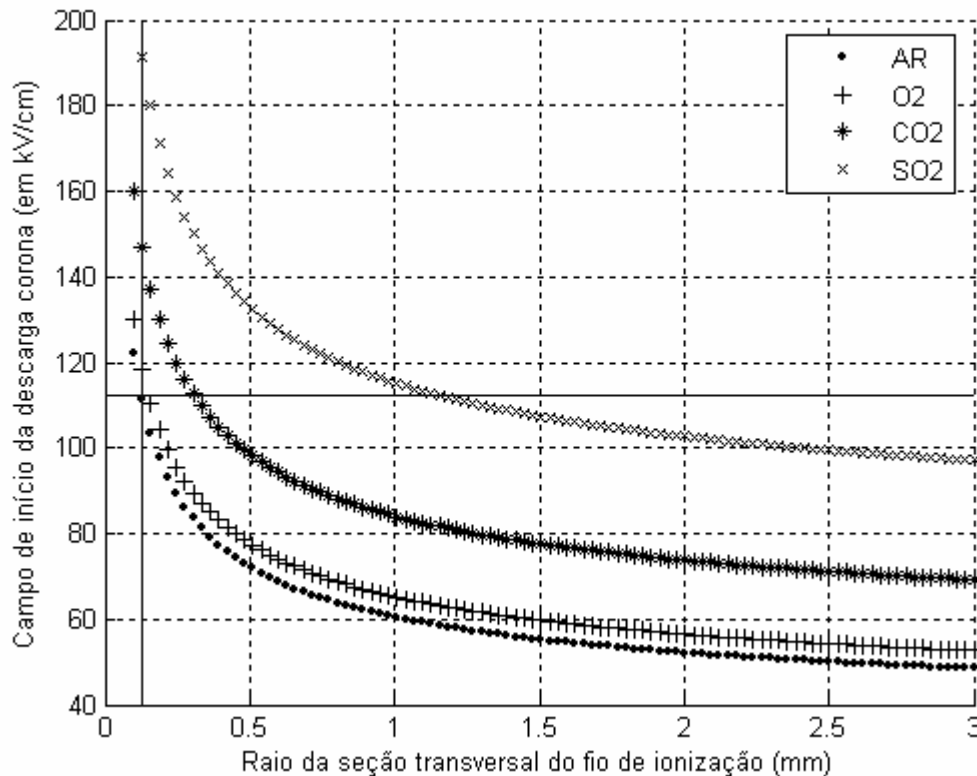


Figura 2.10: Campo de início da descarga corona para vários gases, em função do diâmetro do fio de ionização.

A partir deste valor, podemos determinar a tensão aplicada entre os eletrodos (fio-placa) necessária para obter esse campo e a variação do campo elétrico com a distância ao fio de ionização. Antes, porém será feita uma aproximação para simplificar a expressão do campo elétrico no estágio ionizador do filtro.

A Figura 2.11-a esboça a direção das linhas de força do campo entre dois cilindros concêntricos, de raios R_1 e R_2 , respectivamente. Essa situação é a que ocorre, por exemplo, em cabos coaxiais e nos filtros do tipo fio-tubo (pressupondo que a distância entre o fio e o tubo é muito menor do que o seu comprimento), onde R_1 é o raio da seção do condutor interno e R_2 , o raio da circunferência formada pela malha ou eletrodo externo.

A expressão para o campo elétrico, no caso dos cabos coaxiais (também válida para o filtro fio-tubo), é bem conhecida e é dada por [6][7]:

$$E(r) = \frac{V}{r \cdot \log_e \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (2-2)$$

Onde:

V, E: Tensão e campo elétrico ao longo da linha imaginária perpendicular às placas e que passa pelo condutor de ionização.

r: distância ao centro do eixo do condutor de ionização.

R_1 : Raio da seção do condutor de ionização.

R_2 : Menor distância do fio à placa.

Na Figura 2.11-b, podemos observar a geometria fio-placa, em que as linhas de força do campo não são uniformes como na fio-tubo analisada anteriormente, e a expressão para $E(r)$, por este motivo, se torna mais complexa. Entretanto, a direção de interesse no campo elétrico em questão é aquela perpendicular às placas paralelas, e que passa pelo fio ionizador.

Nesta direção, o comportamento do campo elétrico e da tensão é similar à obtida no filtro tubular, e as mesmas expressões podem ser utilizadas para ambos os casos, sem prejuízo significativo para os resultados. Além disso, para regiões vizinhas à que esta expressão se aplica, podemos aproximar o campo elétrico para uma forma radial, como mostrado na Figura 2.11-c, facilitando os cálculos.

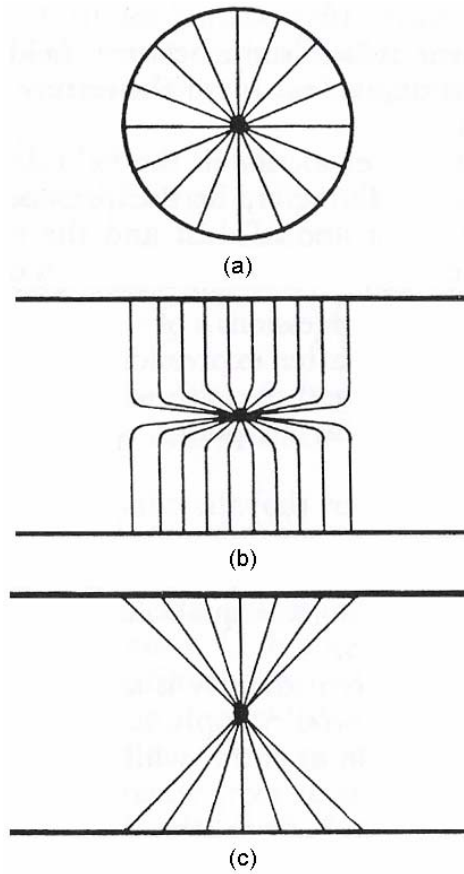


Figura 2.11 (a) Campo radial em um filtro tubular. (b) Campo em um filtro fio-placa. (c) Aproximação radial para o campo do filtro fio placa. [3]

A expressão que determina a tensão (V_s) necessária ao campo (E_s) de iniciação da descarga corona é [1]:

$$V_s = E_s R_1 \log_e \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2-3)$$

Onde:

Es: Campo elétrico para o início da descarga corona.

Vs: Tensão para o início da descarga corona.

Aplicada ao mesmo condutor de 0,25mm (R_1) de diâmetro, com 10 mm (R_2) de espaçamento entre o fio e a placa, encontramos que a menor tensão para o início da ionização é $V_s = 6,16\text{kV}$.

Da expressão 2-2, temos que o campo elétrico cai inversamente com a distância ao fio de ionização. Esse comportamento do campo é mostrado na Figura 2.12.

A variação da tensão, desde o fio ionizador até a placa paralela, onde é tomado o potencial de referência (0V), calculada para os mesmos parâmetros citados anteriormente, é exibida na Figura 2.13.

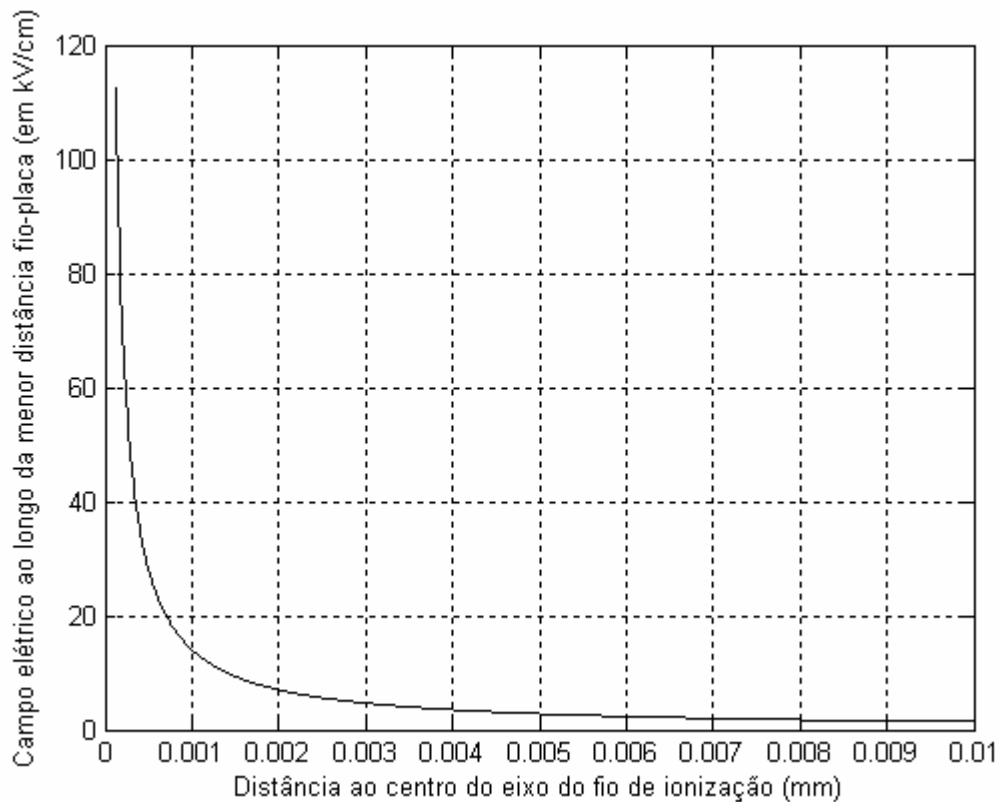


Figura 2.12: Variação do campo elétrico em torno do fio de ionização em função da distância ao seu eixo central.

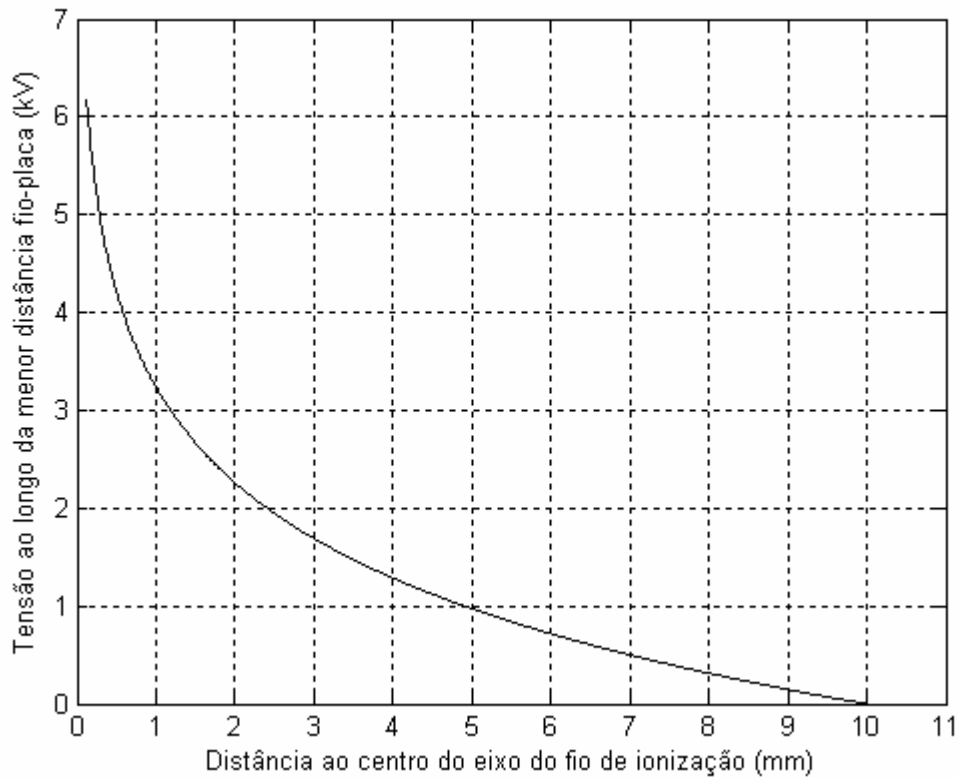


Figura 2.13: Variação da tensão em torno do fio de ionização em função da distância ao seu eixo central.

2.7 – O campo elétrico para o coletor de impurezas

O gás com poluentes, após atravessar a seção de ionização, é direcionado para a seção coletora onde, pela ação de um campo elétrico, as partículas de poluentes serão defletidas para as paredes do coletor, devidamente preparadas para reter determinado tipo de impureza.

Várias configurações e tamanhos de eletrodos podem ser elaborados para o estágio coletor, variando com o tipo e dimensões da impureza a ser retida, procurando minimizar a perda de pressão provocada pela passagem do gás através do filtro, e ajustando o equipamento ao espaço físico em que vai ser instalado.

Duas estruturas básicas utilizadas para a coleta de partículas são a de placas paralelas e a tubular, discutidas a seguir.

2.7.1 – Coletor de Placas Paralelas

Este tipo de coletor utiliza um arranjo de placas paralelas e equidistantes. Cada conjunto de duas placas aterradas possui entre si uma terceira, alimentada em alta tensão. As placas alimentadas em alta tensão são internamente ligadas entre si. A Figura 2.14 mostra este arranjo de placas.

As placas são construídas de forma que o espaçamento entre elas é muito reduzido se comparado às suas dimensões. Assim, o campo elétrico entre elas, para os propósitos deste trabalho e desconsiderando os efeitos de dispersão que ocorrem na borda externa do coletor, pode ser considerado uniforme.

Cada conjunto de duas placas adjacentes constitui um capacitor. A capacitância do conjunto completo é a soma das capacitâncias individuais, que estão em paralelo. Ao ser energizado em alta tensão, percebe-se o armazenamento de carga no coletor. Em decorrência disso, mesmo após desligado, em caso de manutenção no conjunto do filtro, deve-se antes garantir a descarga completa do coletor.

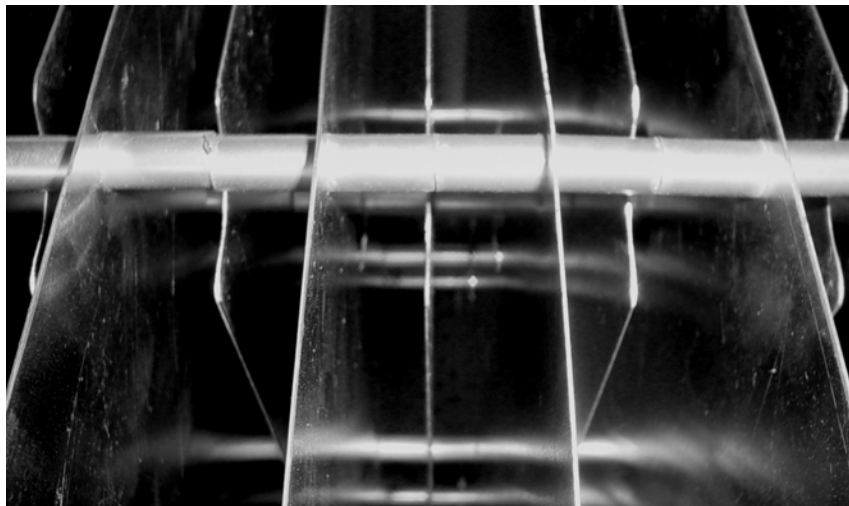


Figura 2.14: Placas paralelas do estágio coletor de um filtro disponível comercialmente

A capacitância de um conjunto de duas placas paralelas pode ser determinada pela expressão:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2-4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_R \varepsilon_0 \quad (2-5)$$

Onde, conforme a Figura 2.15, [6][7]:

C: Capacitância do capacitor de placas paralelas.

A: Área superficial das placas.

d: Distância entre as placas paralelas

ε : Permissividade absoluta do meio.

ε_0 : Permissividade do vácuo ($8,854187818 \cdot 10^{12} F / m$).

ε_R : Permissividade relativa ou constante dielétrica do material (1,0006 para o ar).

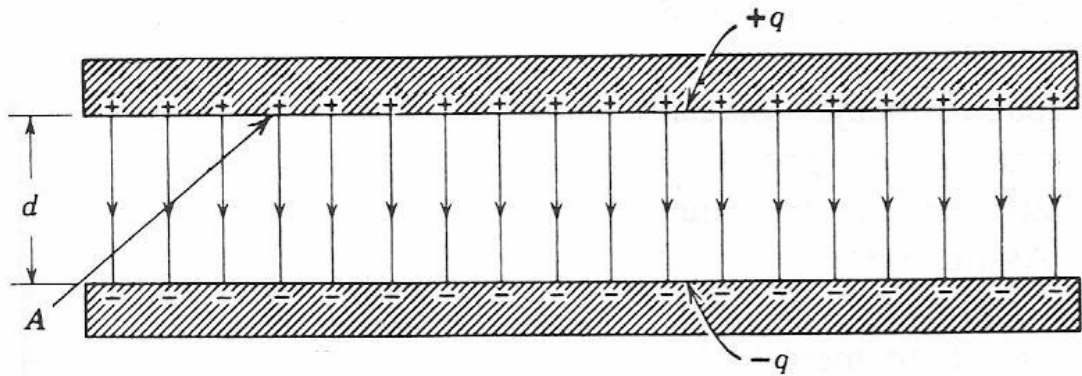


Figura 2.15: Campo uniforme entre as placas paralelas do capacitor

Assumindo o campo uniforme no espaço interno do capacitor, temos que o módulo da intensidade do campo elétrico, em volts por metro, é dado pela relação entre a tensão aplicada e a distância as placas, conforme a equação (2-6):

$$E = \frac{V}{d} \quad (2-6)$$

2.7.2 – Coletor Tubular

O arranjo tubular é outra construção comumente utilizada como estágio coletor. Nessa configuração, a alta tensão é aplicada entre a superfície dos tubos externo (aterrada) e interno (que são concêntricos). Na configuração de estágio único, temos o fio corona em lugar do tubo interno (participando simultaneamente dos processos de ionização e da formação do campo elétrico no processo de coleta de partículas). A Figura 2.16 mostra este tipo de coletor

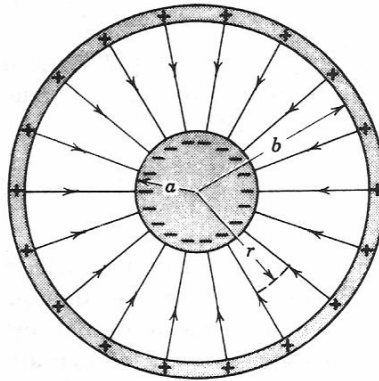


Figura 2.16: Campo radial no espaço interno de um capacitor cilíndrico [6]

Neste coletor, as linhas de campo são radiais e passam pelo eixo do conjunto. O módulo do campo elétrico no espaço entre os tubos é maior nas proximidades do tubo interno, e decresce à medida que se afasta do mesmo.

A expressão do módulo do campo elétrico é a mesma de um capacitor cilíndrico, constituído de dois cilindros de raios “ a ” e “ b ”, e comprimento “ l ” [6][7]:

$$E = \frac{q}{(2\pi\epsilon)rl} \quad (2-7)$$

A capacitância do coletor tubular é dada pela expressão:

$$C = \frac{(2\pi\epsilon)l}{\ln(b/a)} \quad (2-8)$$

2.8 – A Mobilidade dos Gases no Processo de Filtragem Eletrostática

A deflexão das partículas de poluentes no estágio coletor não depende apenas da intensidade do campo; varia conforme o gás que se deseja purificar. Na presença de um campo elétrico, as partículas carregadas presentes no gás estarão sujeitas a uma força que as deslocará com uma velocidade diretamente proporcional ao campo e inversamente proporcional à densidade do gás [4].

A componente de velocidade na direção do campo é definida como mobilidade (K), ou simbolicamente:

$$K = \frac{u}{E} \quad (\text{m}^2/\text{Vs}) \quad (2-9)$$

Onde:

u : Velocidade média de deslocamento da partícula na direção do campo elétrico

E : Intensidade do campo elétrico.

A mobilidade é basicamente característica do gás por onde a partícula se move. Alguns valores de K para vários íons positivos e negativos são mostrados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Mobilidade de gases carregados a 0°C e 760mmHg (em cm^2/Vs) [4].

Gás	K^-	K^+
Ar (seco)	2,10	1,36
Ar (muito puro)	2,50	1,80
CO	1,14	1,10
CO ₂	0,98	0,84
O ₂	1,80	1,31
SO ₂	0,41	0,41

2.9 – Remoção de impurezas no coletor

Uma vez atraída para a superfície coletora, deve-se trabalhar as impurezas de modo a serem retiradas das placas ou eletrodos em que estiverem depositadas. Caso não sejam retirados, os poluentes coletados acumulados podem prejudicar o desempenho do processo de filtragem eletrostática.

As impurezas atraídas para as placas do coletor, ao entrar em contato com essas placas, se descarregam eletricamente nas mesmas. Dependendo do tipo de poluente, as partículas de sujeira podem ficar impregnadas no coletor, formando uma camada espessa sobre suas placas, conforme ilustrado na Figura 2.17. Quando estas impurezas forem de alta resistividade, a camada formada pode dificultar a descarga das partículas ionizadas, criando uma distribuição de carga próxima às placas coletoras e provocando o efeito conhecido como corona reversa, que é totalmente indesejável e pode fazer com que os poluentes voltem a entrar na corrente de passagem do gás.

O processo regular de limpeza é essencial para manter o filtro em boas condições de operação. O procedimento vai depender das características do poluente e da superfície em que ficou depositado. A periodicidade vai depender da velocidade para o acúmulo crítico de impurezas, que quando atingido não permite garantir o desempenho ótimo do processo de filtragem.

Alguns tipos de partículas não impregnantes se soltam pela simples interrupção (ou mesmo inversão do sentido) do campo elétrico do estágio coletor. Outras, para se desprender, podem necessitar de lavagem do equipamento com um solvente apropriado. A disposição vertical do coletor facilita a sua limpeza, já que nessa posição, a ação da gravidade colabora com a precipitação das impurezas.

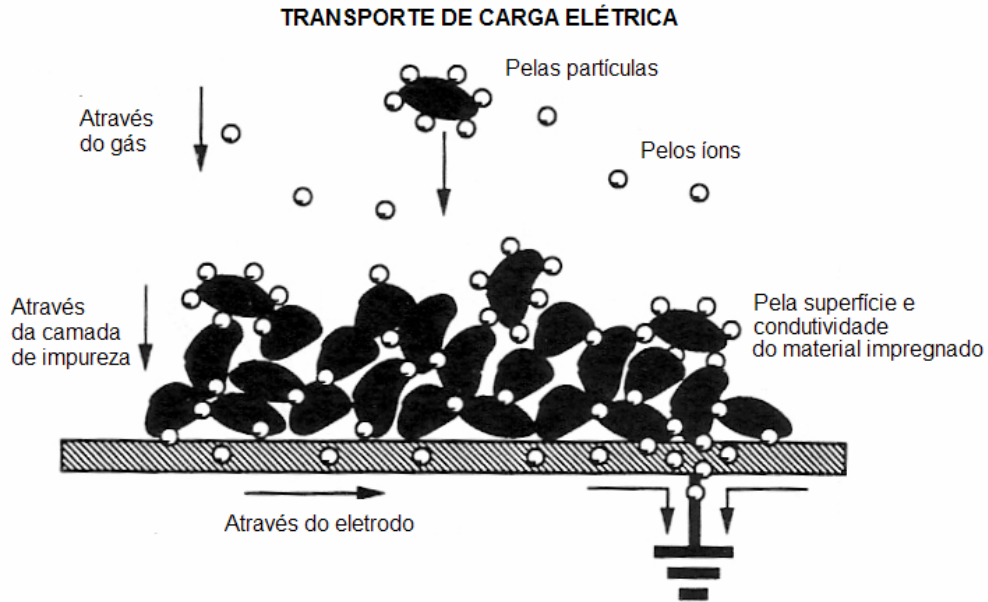


Figura 2.17: A descarga das partículas pelo coletor fica incompleta quando uma camada isolante fica depositada sobre sua superfície, podendo provocar corona reversa [1].

Um modo de retirar alguns tipos de partículas do coletor é despejar continuamente uma lâmina de fluido adequado por sobre as placas, retendo e carregando a impureza para fora do sistema eletrostático. Neste caso, o projeto da estrutura mecânica deve-se cuidar para que a umidade e o fluxo de água não prejudiquem os processos elétricos do filtro.

Muitas impurezas (como as gorduras) ficam naturalmente impregnadas à superfície do coletor. Para a limpeza deste tipo de poluente, um processo de lavagem regular (após determinada quantidade de horas de funcionamento ou quando certas condições mínimas de operação passam a não ser mais atingidas) das placas coletoras costuma ser utilizado.

2.10 – Conclusões

Neste capítulo foram abordados os princípios de funcionamento da filtragem eletrostática, destacando as estruturas de filtros empregadas e os processos elétricos envolvidos.

O campo elétrico para a ionização das partículas no ar deve ser tal que produza corona estável no eletrodo ionizador. A polaridade da tensão aplicada interfere nas características do corona.

O campo elétrico para a coleta de impurezas deve ser uniforme para não produzir ionização. Este campo deflete as partículas suspensas no ar para as placas coletoras, deixando-o mais puro.

A limpeza e a manutenção regular dos filtros são importantes para a manutenção de suas funções. O acúmulo de poluentes nos eletrodos pode levar à formação de corona reversa, prejudicando o processo de filtragem.

Capítulo 3

O Filtro Eletrostático em Estudo

3.1 – Introdução

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi selecionado um filtro eletrostático projetado para a retirada de fumaça e gordura do ar. Como os processos elétricos envolvidos são próprios dos sistemas eletrostáticos de purificação de ar, a abordagem que segue pode ser estendida a outros modelos de filtro.

As características e deficiências de funcionamento deste filtro, bem como a proposição de alterações, são discutidas a seguir.

3.2 – Aspectos Gerais

O filtro adotado trabalha com circulação forçada de ar. A vazão nominal do fluxo de ar, dada no catálogo do sistema de filtro, é de $1650\text{m}^3/\text{h}$. A Figura 3.1 mostra as dimensões mecânicas externas do equipamento.

Os bocais de entrada e saída de ar podem variar em formato e tamanho, proporcionando um acoplamento adequado do filtro aos dutos condutores do ar a ser purificado.

A eficiência nominal de filtragem do equipamento é de 93% a 99%. O consumo de energia especificado é de 100W a 500W, dependendo do tipo de poluente, eficiência, etc.

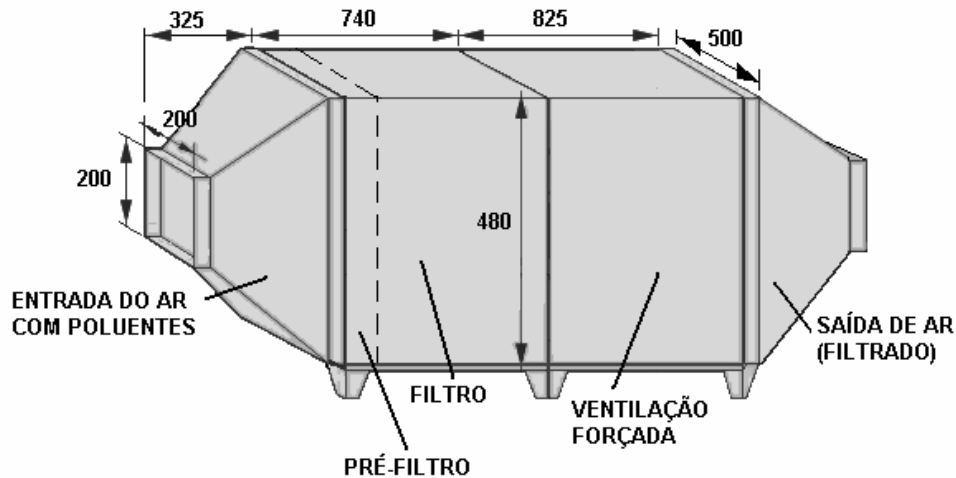


Figura 3.1: Dimensões mecânicas do filtro utilizado.

3.3 – Aspectos Mecânicos

O filtro em estudo é do tipo de placas paralelas, e realiza a ionização e coleta de partículas em estágios separados. Entretanto, um acoplamento eletromecânico entre os dois estágios faz com que ambos sejam alimentados por uma única fonte de alimentação.

O ionizador (mostrado na Figura 3.2) é constituído de fios alimentados em alta tensão entre placas paralelas aterradas. O diâmetro dos fios é de 0,25mm. A distância entre o fio e a placa adjacente é de 10mm.

O coletor é constituído de forma a dispor de uma placa alimentada em alta tensão entre cada conjunto de duas placas aterradas. Cada conjunto ionizador/coletor do equipamento, mostrado na Figura 3.3, é construído de forma modular, e pode ser expandido conforme a necessidade. O espaçamento entre placas adjacentes é de 10mm.

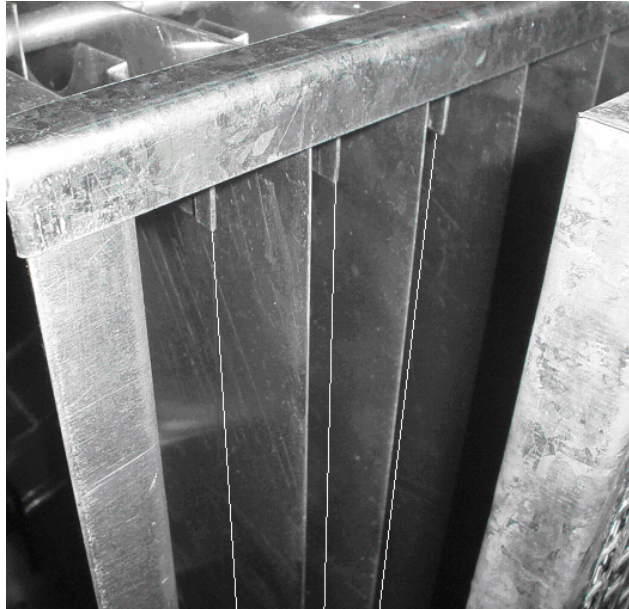


Figura 3.2 – Ionizador fio-placa

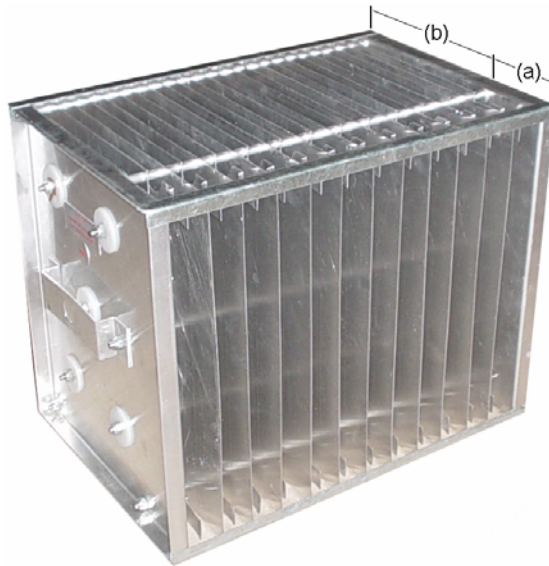


Figura 3.3: Estágios (a) ionizador e (b) coletor de um filtro eletrostático comercial.

O filtro em estudo é dotado de grades, conforme mostrado na Figura 3.4, ou pré-filtros, com as funções de deixar o fluxo de ar homogêneo, evitando o escoamento turbulento do gás no interior do filtro, e de impedir a passagem de partículas cujas dimensões possam provocar um curto-circuito nos eletrodos. Em todas as considerações

deste trabalho, o gás que flui é o ar, cujo fluxo é suposto laminar, distribuído uniformemente nos vários estágios do filtro. Além disso, o filtro trabalha com circulação forçada, mantendo constante a vazão de gás que o atravessa.

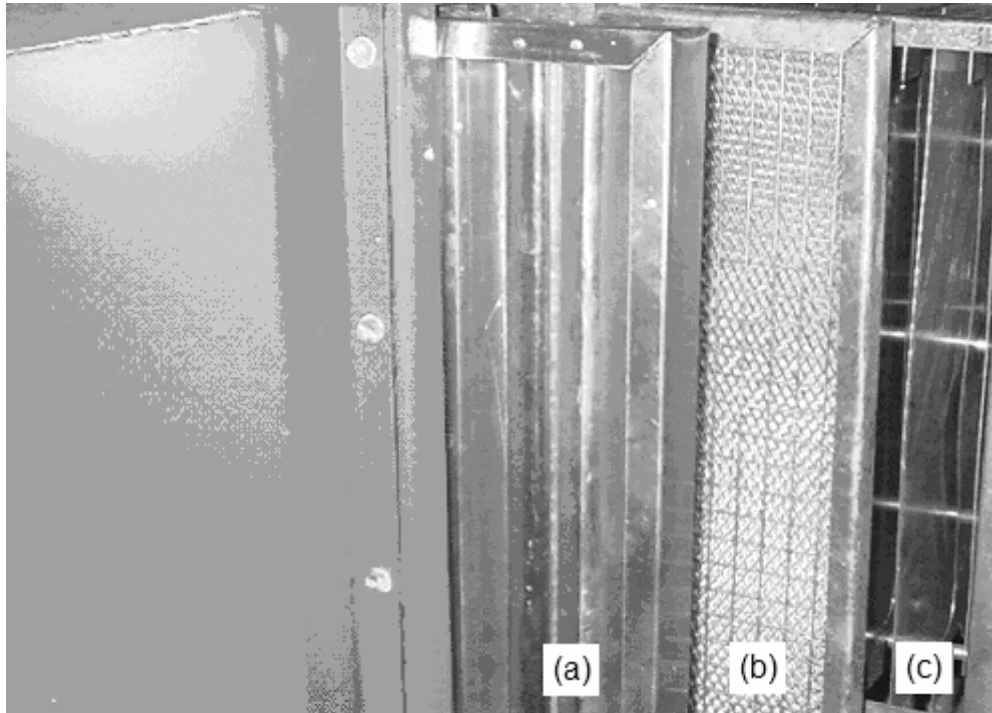


Figura 3.4 – Grades para (a) retirada de partículas de grandes dimensões e (b) homogeneização do fluxo do ar. (c) ionizador

3.4 – Deficiências de funcionamento do filtro original

O conversor eletrônico até então implementado no filtro eletrostático deste trabalho possui uma única tensão de saída de alta tensão alimentando ambos os estágios ionizador e coletor, não permitindo o ajuste em separado dos campos elétricos dos mesmos. O esquema dos estágios do filtro é mostrado na Figura 3.5.

Como o campo elétrico necessário para formar a descarga corona tem características distintas daquele para a coleta das partículas de impureza, alimentar os

dois estágios com uma tensão comum inviabiliza o controle eletrônico das características do filtro.

Com tal forma de instalação, o aumento da intensidade do campo ionizador significaria aumentar também o campo do estágio coletor. Se as placas coletoras estiverem muito próximas, pode-se chegar ao campo crítico e levar à geração de arco-voltaico entre aquelas onde o nível de ionização desejado seja alcançado. Se estiverem distantes, o campo entre placas do coletor pode não ser suficiente para defletir as partículas de impurezas em determinado nível de ionização.

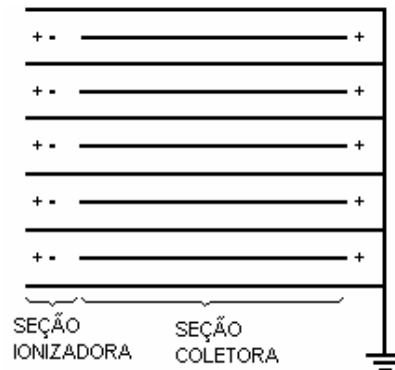


Figura 3.5: Diagrama esquemático dos estágios ionizadores e coletores do filtro em estudo.

Durante o funcionamento do filtro, à medida que os poluentes são retirados do ar, as placas coletoras ficam impregnadas de impurezas. Essa camada de poluentes sobre o coletor, dependendo do material que a constitui, age como uma extensão da placa coletora, reduzindo progressivamente a distância efetiva entre as placas. Para manter o campo elétrico constante, a tensão entre os eletrodos deve ser reduzida à medida que a distância entre as placas diminui. Com tensão única nos estágios do filtro, isso significaria diminuir o campo elétrico para a ionização do gás, com queda na eficiência da filtragem.

A fonte encontrada no equipamento não possuía controle da tensão de saída, cujo valor reduzia largamente com a carga aplicada. A tensão, ora excessiva, pela alta

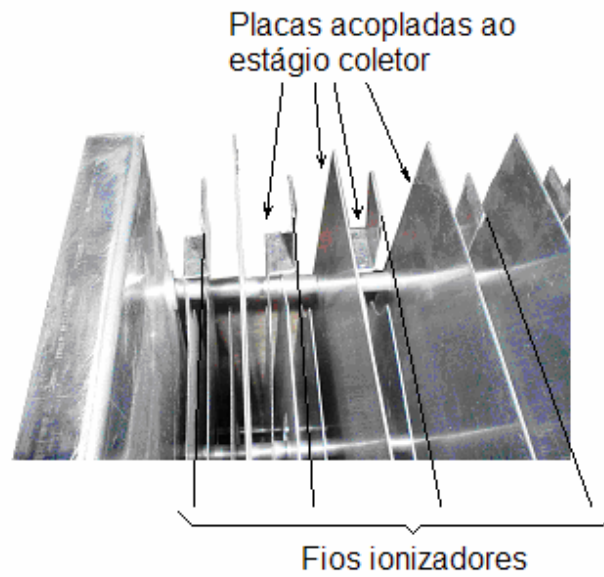
intensidade do campo elétrico, levava à formação de ozônio e ao consumo adicional de energia. Quando insuficiente, a tensão de saída reduzia a eficiência da filtragem, pela incapacidade de ionizar as moléculas de gás.

O conversor original não apresentava meios de proteção para as várias situações de falha possíveis do mesmo, nem indicação para o operador que indicasse o status de funcionamento do filtro. O momento programado para a limpeza e a manutenção naquele equipamento é estimado e baseado na experiência, pelo número de horas de funcionamento de instalações similares, ou na ocorrência de defeitos, quando o filtro deixa de funcionar. Além disso, havia grande ruído audível, pela frequência utilizada no conversor.

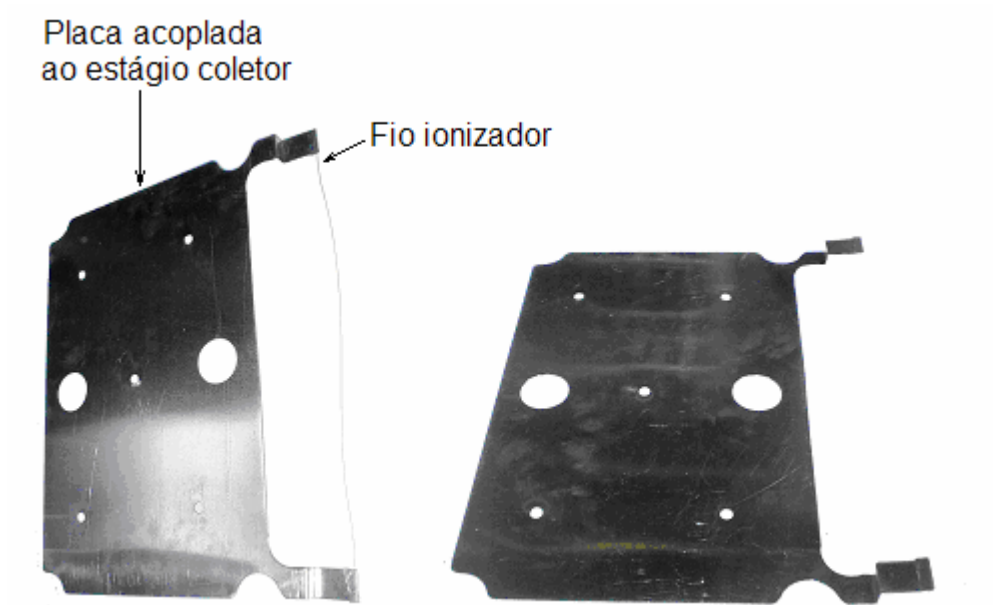
3.5 - Proposta de filtro eletrostático com campos independentes dos estágios ionizador e coletor utilizando conversores de alta tensão

O filtro eletrostático em estudo foi construído para operar com fonte de alimentação única para os estágios ionizador e coletor de partículas. De modo a permitir o controle em separado para cada estágio, foi necessário realizar alterações na estrutura mecânica do filtro.

No projeto original, os fios do ionizador estão mecanicamente acoplados e sustentados por placas do estágio coletor de partículas, conforme pode ser observado na Figura 3.6-a. A Figura 3.6-b mostra em separado uma das várias placas que realiza tal acoplamento.



(a)



(b)

Figura 3.6: (a) Acoplamento dos estágios ionizador e coletor de partículas. (b) Placa com fio ionizador acoplada ao coletor.

O desacoplamento dos estágios do filtro foi conseguido pela alteração das placas coletoras da Figura 3.6-b, resultando nas placas mostradas na Figura 3.7.

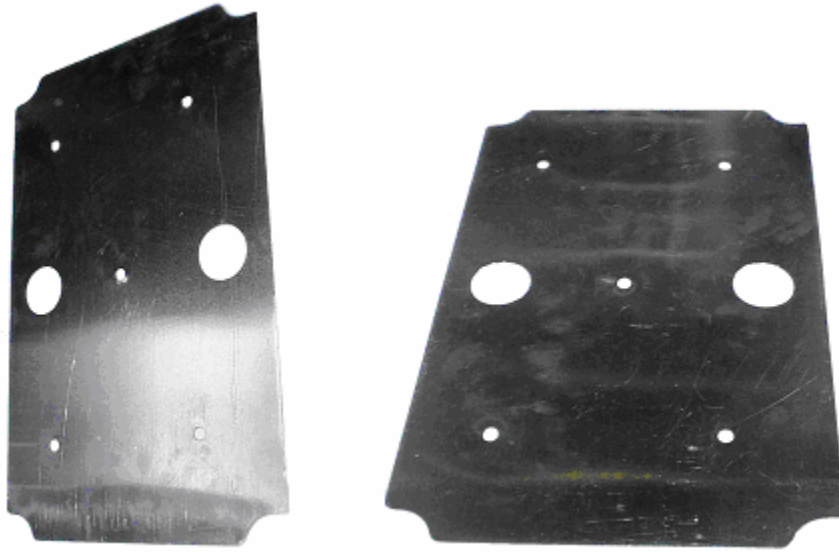


Figura 3.7: Placas do filtro modificadas, mantidas para a utilização na seção coletora e eliminando o acoplamento com o fio ionizador.

Um novo suporte foi elaborado para a fixação do fio ionizador, que para funcionar de modo independente do coletor, foi afixado com material isolante (conforme figura 3.9).

O suporte isolante para o fio ionizador deve ser tal que minimize a fuga de corrente e seja passível de acúmulo de impureza em sua superfície sem impacto no funcionamento do equipamento.

No experimento, foram utilizados tubos de fenolite com espessura suficiente para suportar uma tensão de até 20kV, suficiente aos propósitos da pesquisa.

As figuras 3.8 até 3.13 mostram a realização das modificações mecânicas citadas, visando desacoplamento dos estágios do filtro.

A Figura 3.8 mostra a furação na estrutura do filtro, feita para conter o novo suporte isolante do fio ionizador. Conforme pode ser visto na Figura 3.9, nas placas

intermediárias do filtro, os furos foram feitos com um diâmetro que impede o contato com o suporte do sistema de ionização.

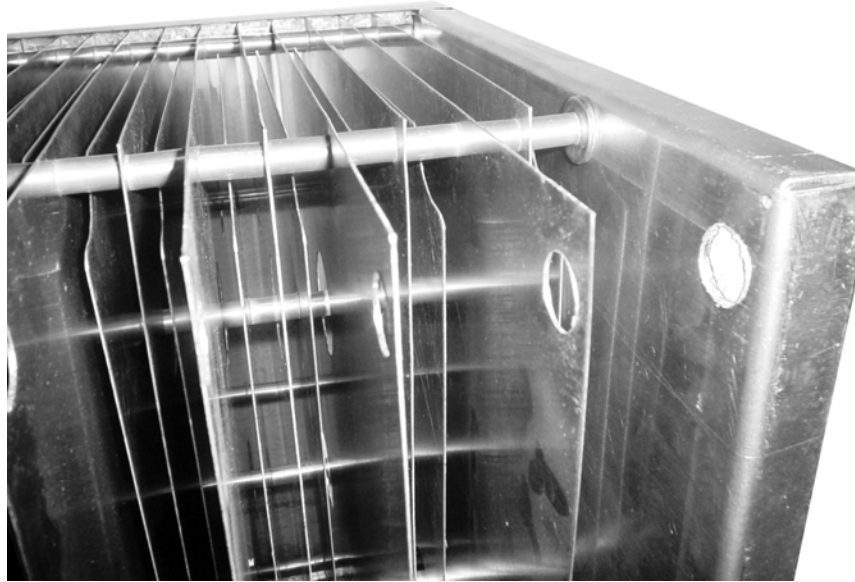


Figura 3.8: Furação realizada na estrutura do filtro para conter o novo suporte (isolado) do fio ionizador.

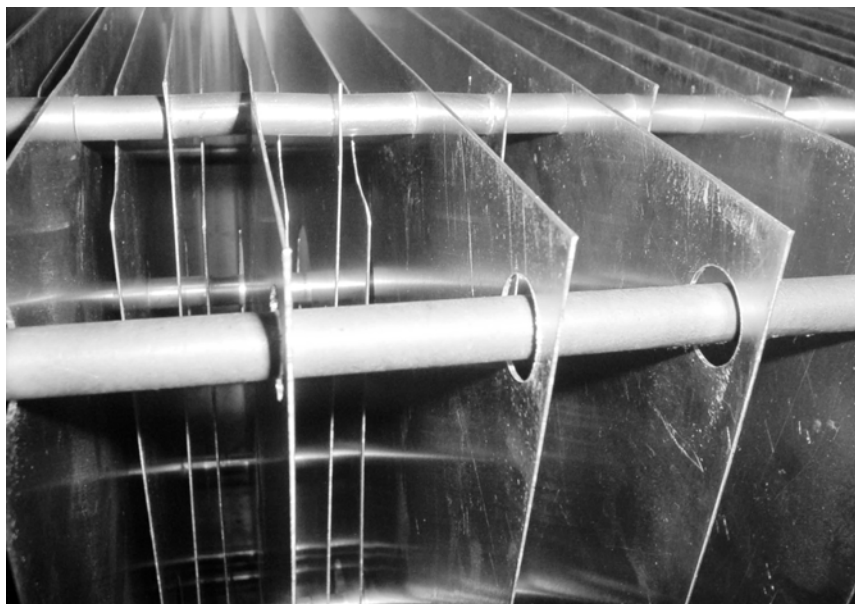


Figura 3.9: Suporte de fenolite elaborado para o fio de ionização.

A Figura 3.10 mostra que apenas as extremidades do tubo de fenolite foram fixadas mecanicamente à estrutura do filtro. O isolante do ionizador foi deixado sem contatos com as placas para impedir que a deposição de impurezas sobre a superfície criasse um caminho de baixa resistência para a passagem de corrente entre o fio de ionização e a placa adjacente.



Figura 3.10: O suporte do ionizador afixado em suas extremidades.



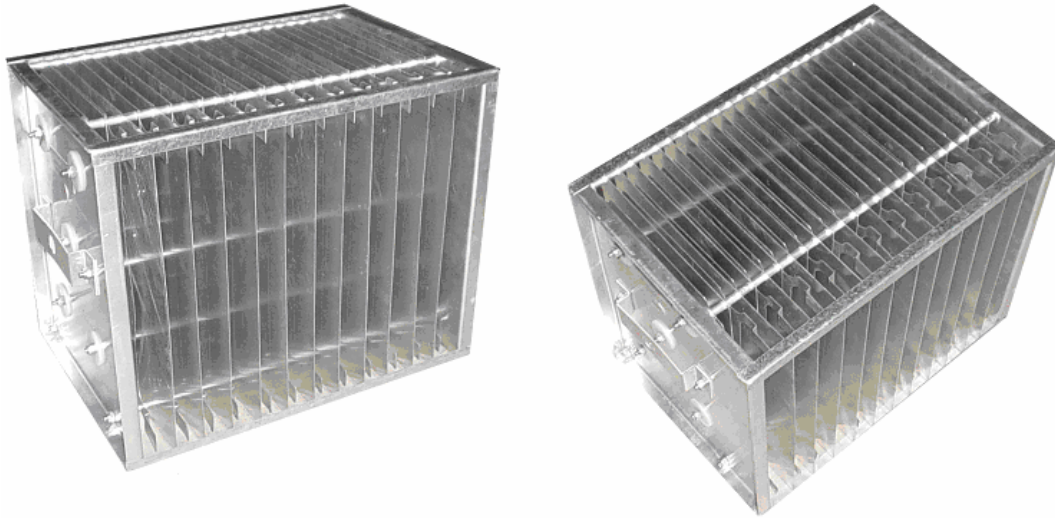
Figura 3.11: Fio ionizador preso ao suporte isolado, no ponto central entre cada conjunto de duas placas paralelas.

O tubo isolante foi disposto de furos espaçados ao longo de seu comprimento, nos quais os fios ionizadores foram fixados. A disposição destes furos é tal que centralizado entre cada conjunto de duas placas paralelas, exista um fio na posição vertical. A Figura 3.11 mostra a fixação do fio ionizador ao seu suporte. A Figura 3.12 mostra uma vista ampliada do ponto de fixação do fio ionizador.



Figura 3.12: Fio ionizador ampliado para visualização.

A Figura 3.13 mostra a visão comparativa dos estágios ionizador e coletor, dos filtros original e modificado. A partir das alterações realizadas, conversores independentes podem ser implementados em cada estágio, permitindo atuar de forma independente sobre cada campo elétrico envolvido no processo de filtração.



(a)



(b)

**Figura 3.13: (a) Estágios do filtro original.
(b) Estágios do filtro após modificação.**

3.6 – Conclusões

Um filtro eletrostático, projetado para a retirada de fumaça e gordura do ar, foi escolhido para a realização deste trabalho. Como os processos elétricos envolvidos são próprios dos sistemas eletrostáticos de purificação de ar, a abordagem do trabalho pode ser estendida a outros modelos de filtro.

O filtro estudado é do tipo de placas paralelas. O processo de ionização e coleta de partículas no equipamento ocorre em estágios separados. Um acoplamento eletromecânico entre os dois estágios faz com que ambos sejam alimentados por uma única fonte de alimentação.

A alimentação dos estágios do filtro com tensão única (pelas características distintas dos campos elétricos envolvidos) impede a otimização simultânea da ionização e da coleta de partículas.

O desacoplamento dos estágios do filtro permite o melhor ajuste do conversor de alta tensão aos requisitos de filtragem do equipamento utilizado.

A estrutura mecânica do equipamento original foi alterada para separar a alimentação dos estágios do filtro, tornando possível o ajuste independente dos campos de ionização e de coleta de partículas.

Capítulo 4

Conversores Estáticos para Alta Tensão Aplicados à Filtragem Eletrostática

4.1 – Introdução

Para o funcionamento dos processos de ionização e de coleta de impurezas dos filtros eletrostáticos, são necessárias fontes de alimentação com alta tensão de saída. O valor da alta tensão necessária vai depender da aplicação e da geometria do filtro.

Uma fonte de alimentação de alta tensão tradicional utiliza transformadores de alta tensão trabalhando na frequência de linha. O valor médio da tensão de saída neste conversor é geralmente controlado pelo acionamento de interruptores estáticos (como tiristores) no lado primário do transformador [8].

A operação em baixa frequência resulta em transformador de grandes dimensões, grandes perdas de energia e lentidão na resposta transitória deste tipo de fonte de alimentação.

Visando solucionar estes problemas, propõe-se um conversor controlado de alta tensão operando em alta frequência, otimizado para a aplicação de filtragem eletrostática.

4.2 – Conversores de Alta Tensão

Várias topologias de conversores para alta tensão são possíveis para a utilização em filtragem eletrostática. O tipo recomendado depende do porte da aplicação específica, conforme as especificações de tensão e potência de saída necessária à operação do processo de filtragem.

4.2.1 – Fonte de alta tensão de baixa frequência controlada por tiristor

A fonte de alimentação controlada por tiristor trabalha na frequência de linha. A alta tensão na faixa de 40kV a 100kV é gerada por um transformador de 50Hz/60Hz. A tensão de saída é controlada variando os taps das bobina do primário ou pela variação do o ângulo de disparo do tiristor no circuito que alimenta o primário do transformador. É o tipo mais comum de fonte para uso em filtros eletrostáticos.

A Figura 4.1 mostra o esquema básico deste tipo de fonte de alta tensão. Como o processo de filtragem requer tensão de saída contínua, um retificador em ponte é instalado no secundário do transformador.

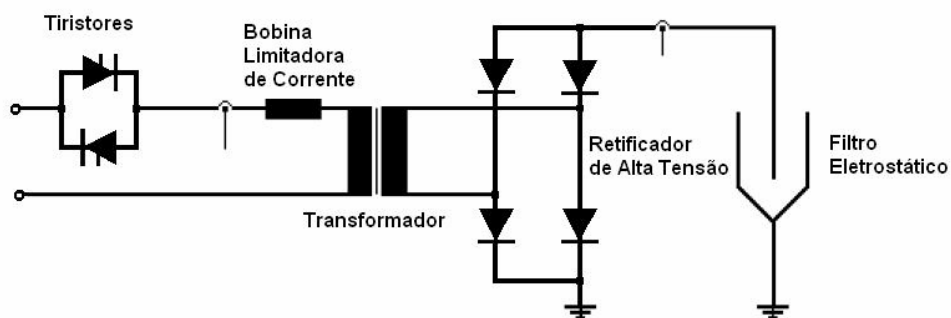


Figura 4.1: Esquema de uma fonte de alimentação de baixa frequência controlada por tiristor [8].

A bobina em série com o enrolamento primário do transformador tem a finalidade de limitar o crescimento da corrente no caso de ocorrerem arcos-voltaicos na estrutura do filtro eletrostático.

A tensão de ondulação na saída filtro eletrostático depende da capacitância e da resistência elétrica do mesmo, que resultam das condições do processo e das dimensões mecânicas do equipamento.

Os arcos-voltaicos ocorrem nos picos da alta tensão no filtro, limitando o valor máximo de pico da tensão de saída. Como a tensão de saída não pode ser livremente aumentada para prevenir a ocorrência de arcos, à medida que a ondulação aumenta, a potência da descarga corona diminui, prejudicando a filtragem.

4.2.2 – Inversor de Alta Frequência transistorizado

A Figura 4.2 mostra um esquema de circuito composto por um inversor de alta frequência em ponte completa baseado em interruptores estáticos (IGBT ou MOSFET), transformador (em óleo isolante) de alta tensão e alta frequência, retificador de alta tensão e indutor série, cuja saída atua como filtro de corrente.

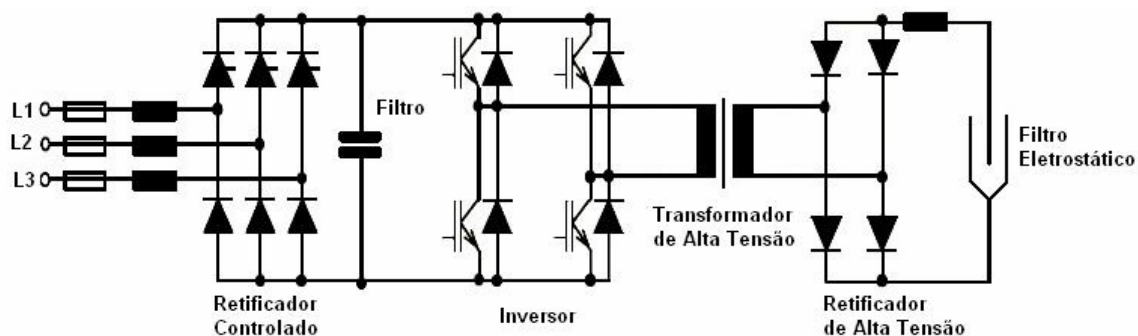


Figura 4.2: Fonte com inversor de alta frequência baseado em IGBT e retificador de alta tensão [8].

O inversor tem, em sua entrada, um retificador trifásico controlado e um capacitor de filtro. A tensão de entrada do inversor é controlada pelo retificador misto. Na saída do transformador, um retificador de alta tensão converte a tensão de alternada para contínua.

A aplicação de fontes de alimentação em alta frequência melhora significativamente o funcionamento do filtro eletrostático. A Figura 4.3 ilustra, de forma comparativa, o comportamento das tensões e correntes entre os conversores de baixa e de alta frequência.

Percebe-se que na ocorrência de arco-voltaico, o pequeno tempo de comutação (em torno de 200ns comparado aos 10ms dos conversores convencionais de baixa frequência), melhora o tempo de ionização do ar e torna o restabelecimento da tensão de saída aos seus níveis normais muito mais rápido.

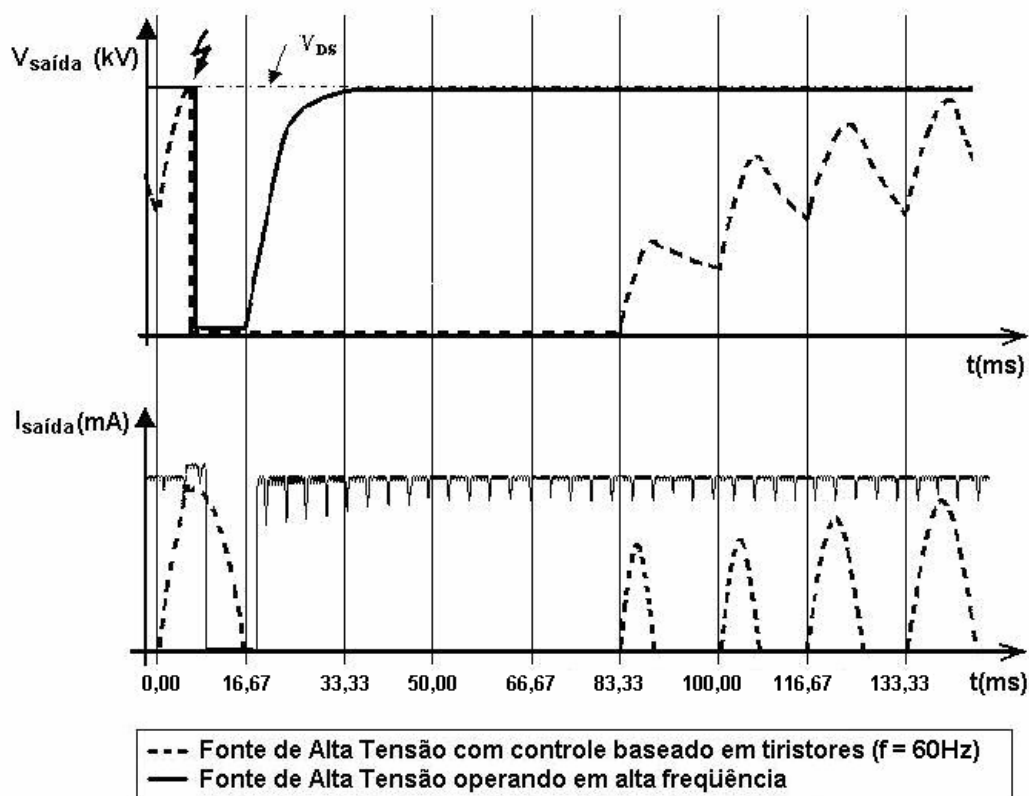


Figura 4.3 – Comparação das formas de onda de tensão e corrente de saída do filtro eletrostático utilizando fontes de baixa e de alta frequência [8].

Com o menor tempo de restabelecimento da tensão de saída, o conversor de alta frequência permite uma maior taxa de repetição da ocorrência de arco-voltaico, resultando em maior potência elétrica disponível para o filtro, e conseqüente redução da passagem de poluentes.

Outra diferença está na tensão de ondulação de saída, muito menor quando utilizado o conversor de alta frequência. Com isso, a tensão no filtro pode ser elevada para níveis bem próximos, mas inferiores aos da ocorrência de arco-voltaico, otimizando a potência da descarga corona e o processo de filtragem.

4.2.3 – Inversor de Alta Frequência com Multiplicador de Alta Tensão

A Figura 4.4 ilustra o circuito com saída de alta tensão, composto por um inversor de alta frequência em ponte completa, um transformador de alta tensão e alta frequência e um multiplicador de tensão multiestágios.

O inversor é um LCC ressonante. A presença do indutor L_r pode ser física ou apenas a indutância de dispersão do transformador. Há basicamente dois capacitores. O primeiro é o capacitor série C_r , que fica do lado primário do transformador. O segundo é a capacitância parasita do secundário refletida no primário.

O capacitor bloqueia qualquer tensão contínua na saída do conversor, eliminando o risco de saturação do transformador. A presença do indutor no lado primário faz com que o retificador seja alimentado em corrente, não havendo a necessidade de indutor após o retificador. O conversor é naturalmente protegido contra curto-circuito porque funciona como fonte de corrente.

Este tipo de conversor tem aplicação em equipamentos médicos que utilizam raios-x, onde as condições de carga variam amplamente, com valores típicos desde 20kV a 150kV e de 0,5mA a 1,25A, respectivamente. Este tipo de aplicação exige tensões elevadas, com excelentes respostas transitórias e de regime permanente, para diagnosticar as partes mais densas dos ossos. As tensões menores são utilizadas para o diagnóstico dos tecidos macios dos órgãos do corpo humano.

A topologia com multiplicador de tensão é justificada pela necessidade de minimizar a relação de espiras do transformador de alta tensão. A relação de espiras elevada introduz parâmetros parasitas e não linearidades no sistema [9].

Utilizando o multiplicador de tensão multiestágios, pode-se reduzir significativamente o número de espiras do enrolamento secundário, e conseqüentemente, a sua capacitância.

O multiplicador de tensão multiestágios, composto de diodos e capacitores, realiza a conversão da tensão alternada proveniente do transformador, para uma alta tensão contínua na carga. Apresenta o inconveniente de, para ser construído, necessitar relativamente de um grande número de componentes especiais.

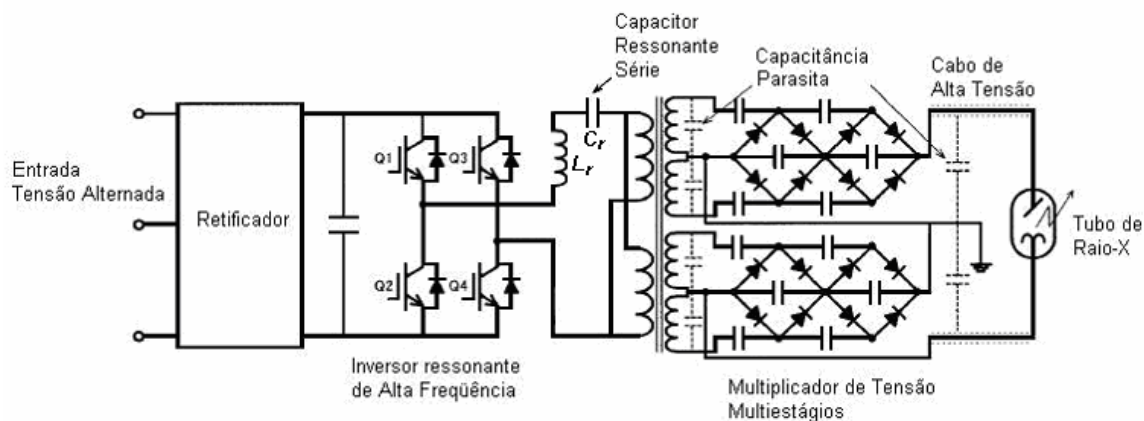


Figura 4.4: Fonte com inversor de alta freqüência e multiplicador de alta tensão. Saída aplicada a um tubo de Raio-X [9].

4.2.4 – Conversor Flyback

O conversor flyback é baseado no conversor buck-boost (abaixador–elevador de tensão) [10]. Este tipo de conversor opera no primeiro quadrante da curva de magnetização do transformador, sendo preferencialmente utilizado quando se requer potências inferiores a 250W. A Figura 4.5-a mostra o circuito básico. Na Figura 4.5-b, o transformador é substituído por um modelo equivalente, com a indutância de magnetização L_M ligada à entrada de um transformador ideal de relação de espiras $1:n$.

Durante o intervalo 1, o transistor Q_1 conduz e o modelo do circuito do conversor se reduz ao mostrado na Figura 4.5-c.

Neste primeiro intervalo, pela polaridade das bobinas do transformador flyback, o diodo D_1 está bloqueado. A energia fornecida pela fonte é armazenada no campo magnético do transformador.

No intervalo 2, o transistor é cortado. A polaridade do transformador se inverte, o diodo D_1 entra em condução, e a energia armazenada no campo magnético do transformador (dois indutores acoplados, também conhecido como enrolamento de duas bobinas) é transferida ao capacitor e à carga na saída do conversor.

No caso da aplicação deste conversor de filtragem eletrostática, o capacitor e a resistência não são componentes discretos, mas são parâmetros elétricos inerentes à estrutura mecânica do equipamento, pela disposição dos eletrodos e placas paralelas.

No segundo intervalo, a alta tensão do enrolamento secundário é refletida para o primário. A tensão de pico do transistor é igual à tensão de entrada mais a tensão de carga refletida no primário, e uma tensão adicional devida a oscilações associadas à indutância de dispersão do transformador. Esse stress de tensão provocado no transistor é uma desvantagem do conversor flyback.

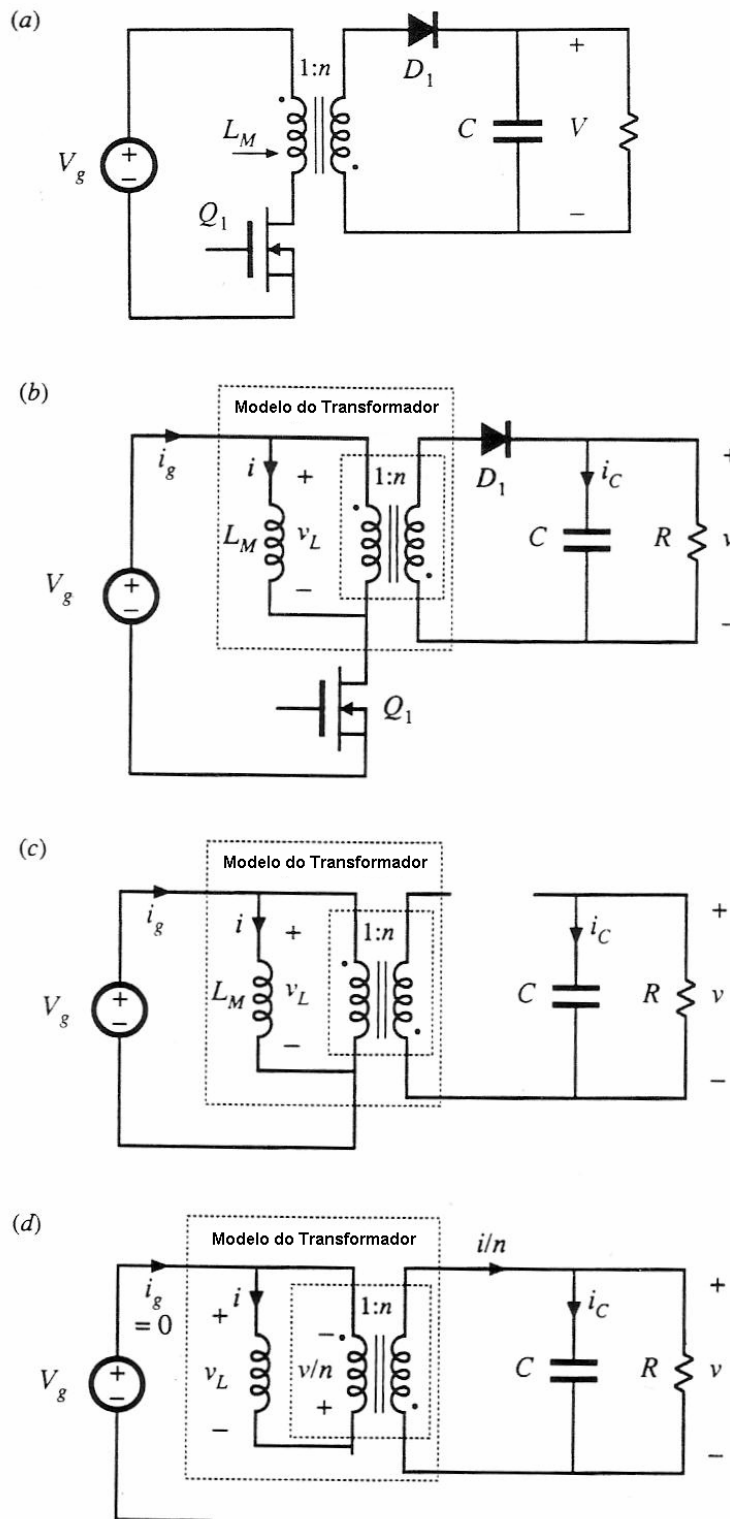


Figura 4.5: Circuito do conversor flyback. (a) Esquema básico, (b) com modelo equivalente do transformador, (c) durante intervalo 1, (d) durante intervalo 2.

No conversor flyback, a relação de conversão ideal varia com a relação cíclica de trabalho, sendo dada pela expressão:

$$M(D) = n \frac{D}{1-D} \quad (4.1)$$

Onde:

$M(D)$: Relação entre as tensões contínuas de saída e de entrada do conversor.

n : Relação de espiras entre enrolamentos do transformador flyback.

D : Ciclo de trabalho.

A Figura 4.6 mostra a variação da relação de conversão com o ciclo de trabalho, para alguns valores da relação de espiras do transformador.

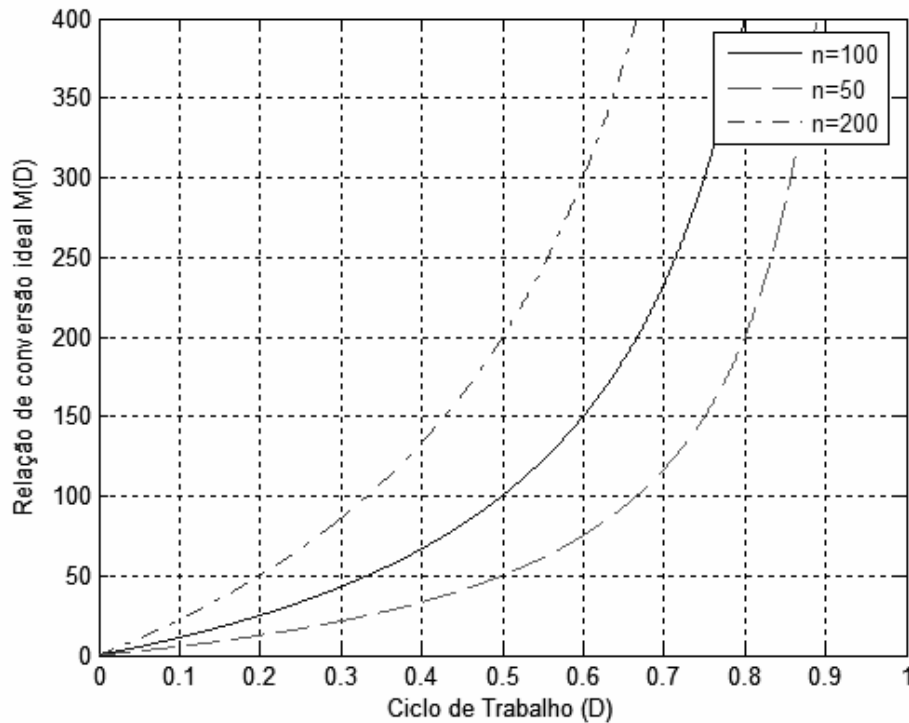


Figura 4.6 – Diagrama da variação da relação de conversão com o ciclo de trabalho

A corrente de magnetização do transformador flyback é unipolar, fazendo com que menos da metade da curva $B-H$ do material do núcleo seja utilizada. A corrente de magnetização contém uma razoável componente contínua, levando à necessidade de precauções contra a saturação do transformador.

Os circuitos de proteção contra a saturação do transformador limitam a máxima relação cíclica de trabalho de forma a garantir a desmagnetização do núcleo.

4.3 – Projeto do Conversor Flyback para a Alimentação do Filtro Eletrostático em Estudo

O filtro eletrostático em estudo, detalhado no capítulo 3, é de pequeno porte, sendo utilizado em filtragem de gordura e fumaça do ar. A fonte de alta tensão, para alimentá-lo, trabalha com potência total inferior a 150W e com valores de alta tensão que não ultrapassam 15kV.

Um conversor que se adapta bem a estas especificações é o flyback, com simplicidade de construção – já que utiliza relativamente um pequeno número de componentes – e facilidade de produção, e que foi selecionado para utilização no presente trabalho. O flyback tem ainda a vantagem de permitir uma grande variação da resistência de carga.

4.3.1 – Função de transferência do conversor flyback

A relação de conversão ideal $M(D)$, conforme a expressão 4.1, está diretamente associada à relação cíclica de trabalho D . Para originar os pulsos no transistor, uma onda triangular é comparada com uma tensão de controle V_C , conforme mostrado na Figura 4.7.

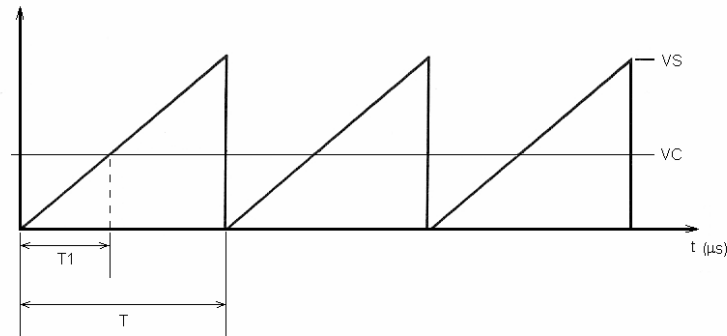


Figura 4.7: Onda triangular comparada a V_C para originar os pulsos no transistor.

O valor da relação cíclica de trabalho pode ser escrito como:

$$D = \frac{V_C}{V_S} \quad (4.2)$$

A função de transferência do conversor flyback foi definida como a relação entre a tensão de saída e a tensão de controle da relação cíclica de trabalho do conversor, conforme a expressão 4.3.

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} \quad (4.3)$$

Conforme demonstrado no anexo C, a função de transferência do conversor flyback é dado por [11]:

$$G(s) = \frac{V_{in}}{V_S} \frac{1}{\sqrt{\frac{2Lf}{R_2}} (1 + sR_2C)} \quad (4.4)$$

Onde:

V_C : Tensão de controle da largura dos pulsos na chave estática.

V_{in} : Tensão contínua de entrada do conversor.

V_{out} : Tensão contínua de saída do conversor.

V_s : Máximo valor da tensão do sinal triangular (tensão de controle dos pulsos).

f : Frequência de chaveamento do conversor.

L : Indutância de magnetização do transformador flyback.

C : Capacitância de saída.

R_2 : Resistência de carga.

Da expressão 4.4 podem ser tiradas duas características importantes do conversor:

- Trata-se de um sistema de primeira ordem, apresentando portanto, um único pólo na função de transferência, simples de ser estabilizado.
- O ganho estático, ou de regime permanente, depende da resistência de carga.

Caso seja considerada uma resistência série RSE no modelo do capacitor do filtro eletrostático, a função de transferência do conversor será alterada de modo a ter um *zero* com frequência ω_z dada pela expressão 4.5. Circuitos compensadores podem ser utilizados para compensar esse zero na função de transferência do flyback.

$$\omega_z = \frac{1}{RSE.C} \quad (4.5)$$

No caso dos filtros eletrostáticos, os valores de R_2 e de C variam com as condições de funcionamento.

Operando em alta tensão, o espaço de carga e a passagem do ar com poluentes criam oscilações na saída do circuito, de modo que os ajustes na relação cíclica devem ocorrer dinamicamente.

4.3.2 – Escolha do Transformador

O anexo D demonstra os métodos para projeto e dimensionamento de transformadores flyback, incluindo a especificação do núcleo, bitolas de condutores e dados dos enrolamentos.

O presente trabalho tem foco sobre o controle do conversor de alta tensão em filtros eletrostáticos, de modo que a construção do transformador não será detalhada.

O transformador utilizado nos conversores foram ajustados para trabalhar na frequência de 30kHz. Cada transformador possui uma capacidade de potência nominal de 150W.

A tensão contínua de entrada do conversor é de 115V. A tensão máxima de saída em aberto do transformador é de 25,5kV.

4.3.3 – A malha de controle do conversor

O filtro eletrostático original trabalha com um único conversor para alimentar os estágios de ionização e o coletor de impurezas. Neste trabalho, propõe-se uma fonte de alimentação para cada estágio, pelas características distintas que o campo elétrico que a alta-tensão por eles gerada possui.

No estágio de ionização, a tensão deve ser mantida constante para manter a descarga corona estável. Para isso ocorrer, a relação cíclica de trabalho do conversor deve se ajustar às condições de carga.

No estágio coletor, as impurezas impregnadas provocam a redução gradativa do canal entre as placas. Enquanto não ocasionar corona reversa, a camada de impureza se torna uma extensão das placas coletoras. Se a tensão permanecer constante, a intensidade do campo aumenta entre os pontos de acúmulo de sujeira, favorecendo a ocorrência de arco-elétrico e conseqüente interrupção de funcionamento do filtro.

O conversor deste estágio deve reduzir gradativamente a tensão de saída, procurando manter o campo elétrico constante mesmo diante da impregnação de impurezas nas placas coletoras. Com este objetivo, o controle será feito por corrente constante.

No ionizador, a alta tensão de saída é medida e comparada com o valor de referência desejado, para então sofrer a ação de controle. No coletor, o pico de corrente no enrolamento primário do transformado flyback é controlado de modo a ser mantido constante.

Para o sistema de controle das fontes de alimentação dos dois estágios do filtro eletrostático, serão apresentadas duas malhas de controle.. Em ambos os casos, a alta tensão é controlada variando o ciclo de trabalho no conversor flyback.

4.3.3.1 – O controle para o estágio ionizador

A Figura 4.8 mostra um diagrama de blocos de fonte de alimentação de alta tensão para o estágio ionizador.

O sinal proveniente da saída de alta tensão é atenuado em 1000 vezes e levado a um filtro passa-baixas, para a obtenção do seu valor contínuo. Esse valor é então subtraído da tensão de referência, gerando a tensão de erro que sofrerá a ação de controle.

O controlador adotado é do tipo Proporcional-Integral. O ganho proporcional oferece velocidade na resposta transitória enquanto o integral zera o erro de regime permanente [12].

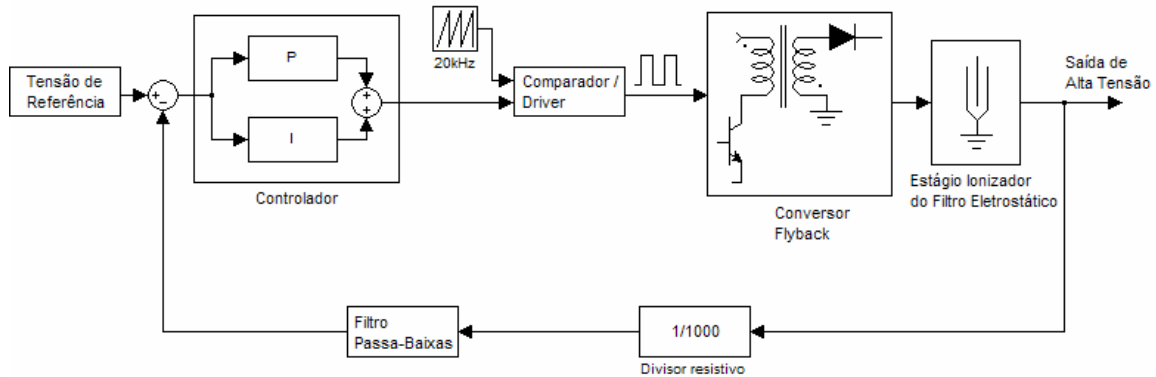


Figura 4.8 – Diagrama de blocos da fonte de alta tensão para o estágio de ionização.

O comparador tem a função de gerar pulsos com ciclo de trabalho proporcionais ao sinal de controle, pela comparação deste com uma onda do tipo rampa, cujo período é ajustável e determina a frequência de chaveamento do conversor.

O circuito *driver* faz a adequação dos pulsos provenientes do comparador com os níveis de tensão necessários à condução e corte da chave estática que, por sua vez, aciona o enrolamento primário do transformador flyback.

Uma variação de carga ou outro distúrbio que faça a alta tensão de saída aumentar além da programada pela referência, provoca um erro negativo que resulta em redução do ciclo de trabalho pelo comparador, restabelecendo o valor de saída original.

De outro lado, a redução da tensão de saída por uma variação de carga ou outro distúrbio, provoca um erro positivo, cujo efeito é o aumento do ciclo de trabalho pelo comparador, restabelecendo o valor de saída original.

Durante a ação de controle, o conversor flyback dispõe de mecanismos de proteção, prevenindo a saturação do transformador e a ocorrência de curtos-circuitos na saída.

A desmagnetização é verificada com uso de um enrolamento auxiliar do transformador flyback. A tensão contínua neste enrolamento, conforme ilustrado na Figura 4.9, é:

- Positiva durante o período ligado da chave.
- Negativa durante o período desligado da chave.
- Igual a zero no tempo morto da chave, com alguma oscilação.

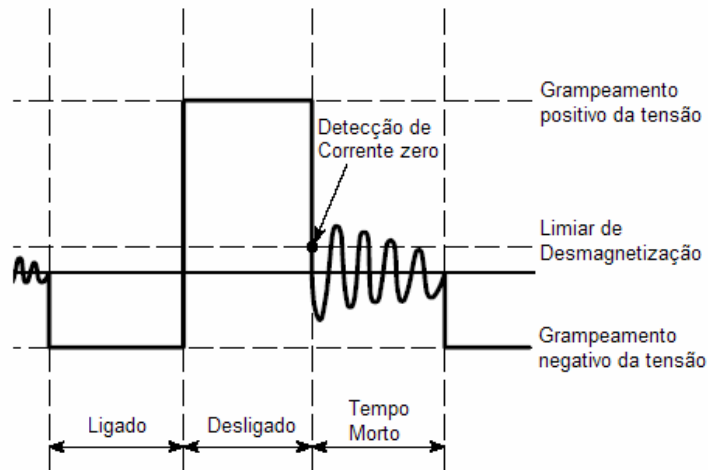


Figura 4.9 - Processo de desmagnetização do transformador Flyback

O circuito de detecção de desmagnetização consiste de um comparador que detecta o ponto onde a amplitude da tensão do enrolamento auxiliar fica inferior ao limiar de desmagnetização.

Durante a fase de desmagnetização, os pulsos na chave ficam desabilitados, prevenindo a ocorrência de saturação no transformador.

4.3.3.2 – O controle para o estágio coletor de impurezas

O conversor dedicado ao estágio coletor do filtro controla o valor de pico da corrente no enrolamento primário do transformador. Pela alimentação com tensão constante, a corrente no enrolamento primário do transformador cresce de forma triangular. Quando o crescimento dessa corrente atingir um valor programado, a chave estática é desligada, de forma que o pico da corrente permanece praticamente constante.

A Figura 4.10 mostra um diagrama de blocos desta segunda fonte de alimentação de alta tensão, destinada ao estágio coletor de impurezas.

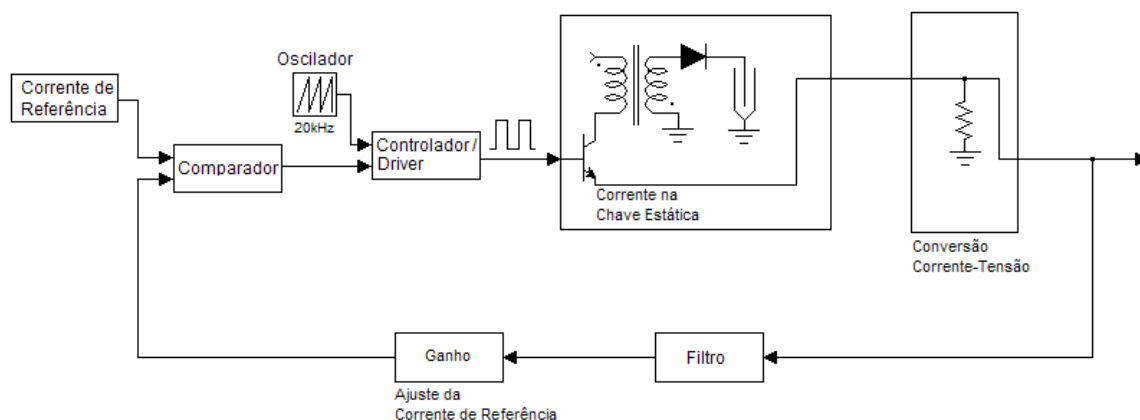


Figura 4.10 - Fonte de alta tensão para o estágio coletor de impurezas

Para a realização do controle, o sinal de corrente no enrolamento primário do transformador é obtido por meio de um resistor série. Após filtrar e ajustar o nível do sinal, o pico da onda de corrente é comparado com um valor de referência.

O controlador / *driver* inicia o ciclo de condução da chave junto com o oscilador e o termina quando a corrente de pico no enrolamento do transformador atinge o valor de referência.

Em condições de operação, se o valor de pico da corrente aumentar pela variação de carga, acúmulo de poluentes nas placas ou algum distúrbio, o comparador detecta a

passagem da corrente pelo valor de referência em um período de tempo menor que o da situação inicial. Isso resulta em um pulso mais estreito na saída do controlador, reduzindo a tensão de saída e o pico da corrente no transformador.

No sentido oposto, com a redução do pico da corrente, o comparador detecta a passagem da corrente pelo valor de referência com um período de tempo maior que o da situação inicial, resultando em um pulso mais largo na saída do controlador, elevando a tensão de saída e restaurando o valor do pico da corrente no transformador.

4.4 – A medição de alta tensão

Várias técnicas de medição de alta tensão podem ser implementadas no conversor implementado, cada uma com suas particularidades.

Uma possibilidade seria a medição indireta, utilizando um enrolamento auxiliar de baixa tensão e estimando a alta tensão de saída pela relação de transformação. Por não garantir boa precisão nas medições, essa técnica não foi abordada.

A medição da alta tensão neste trabalho, necessária para o controle dos conversores propostos, foi realizada diretamente, por meio de divisores de tensão resistivos.

A técnica de medição utilizada tem a desvantagem de não proporcionar um isolamento óptico/galvânico entre os circuitos de baixa e de alta tensão. Entretanto, oferece as vantagens de precisão e de velocidade de resposta, suficientes aos propósitos da pesquisa.

Resistores especiais de óxido metálico revestidos de epóxi e silicone são fabricados para aplicação em alta tensão, com resistências disponíveis desde 100k Ω até

20G Ω , e tolerâncias de até 1%. Dependendo do modelo, suas características permitem suportar altas tensões em torno de 32kV e temperaturas de operação de até 220°C.

A figura 4.11 mostra alguns modelos de resistores para alta tensão fabricados pela *K&M Electronics, Inc.*



Figura 4.11: Resistores de óxido metálico para alta tensão

O divisor resistivo pode ser obtido a partir de resistências de precisão de baixa tensão, desde que algumas providências sejam tomadas visando manter a qualidade da medição e garantir a isolação do circuito e a segurança contra choques elétricos.

Na Figura 4.12-a, resistores de precisão de 10M Ω e 1/4W, com 1% de tolerância, são ligados em série. Na Figura 4.12-b, tal associação é coberta por material isolante. Os detalhes da construção são discutidos a seguir.

Para permitir o trabalho em alta tensão, deve-se cuidar para que seja minimizada(o):

- A corrente de fuga superficial.
- Ionização do ar em torno dos terminais do resistor e nos pontos de solda.
- O risco de choque elétrico.

A corrente de fuga superficial ocorre pelo corpo externo dos componentes, sendo facilitada pelo acúmulo de resíduos e poeira em sua superfície. A ionização do ar em torno dos terminais dos resistores ocorre quando a alta tensão cria em torno destes, um campo elétrico suficiente para quebrar moléculas do ar, gerando íons. A camada iônica que se forma pode ainda levar à ocorrência de arco-voltaico entre os terminais de um determinado resistor, quando as condições de tensão e de campo elétrico forem favoráveis.



(a)



(b)

**Figura 4.12 – (a) Ligação série das resistências de medição.
(b) Isolação externa da associação.**

Os pontos de solda dos resistores também devem ser polidos ou trabalhados, eliminando pontas que possam provocar pontualmente, a alta intensidade de campo elétrico, e conseqüentes pontos de ionização.

A questão da fuga superficial e da ionização foi solucionada também pelo revestimento da associação de resistores por uma camada isolante de silicone, conforme a Figura 4.12-b, que impede o contato dos componentes com o ar e com partículas de poeira.

A figura 4.13 mostra um tubo de silicone, com característica emborrachada, utilizado no revestimento dos resistores.



Figura 4.13: Tubo isolante de silicone utilizado para revestir a associação de resistores.

Para solucionar a questão do isolamento elétrico em alta tensão, a associação de resistores foi coberta também por paredes de fenolite, com espessura suficiente para suportar 20kV, tensão adequada para os propósitos deste trabalho. O tubo de fenolite utilizado é mostrado na Figura 4.14.

O tubo de fenolite utilizado proveu resistência mecânica ao sensor construído, permitindo a instalação de suportes e facilitando a sua instalação no circuito do filtro. A Figura 4.15 mostra o sensor de alta tensão ligado entre a saída de um transformador flyback e a placa de circuito impresso.

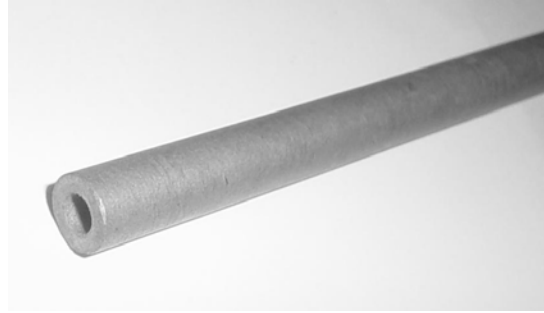


Figura 4.14: Tubo de fenolite utilizado para o isolamento elétrico dos resistores.

Para melhorar a precisão da medida, afetada pela tolerância dos resistores, um potenciômetro é ligado em série com o sensor, permitindo calibrar a leitura da alta tensão com o uso de instrumentos adequados.



Figura 4.15: Fixação do divisor resistivo no circuito impresso do conversor.

4.5 – Construção do conversor

O conversor construído para os estágios do filtro eletrostático é mostrado na Figura 4.16, onde podem ser vistos dois sensores de alta tensão. Cada sensor está ligado a uma das duas saídas de alta tensão.

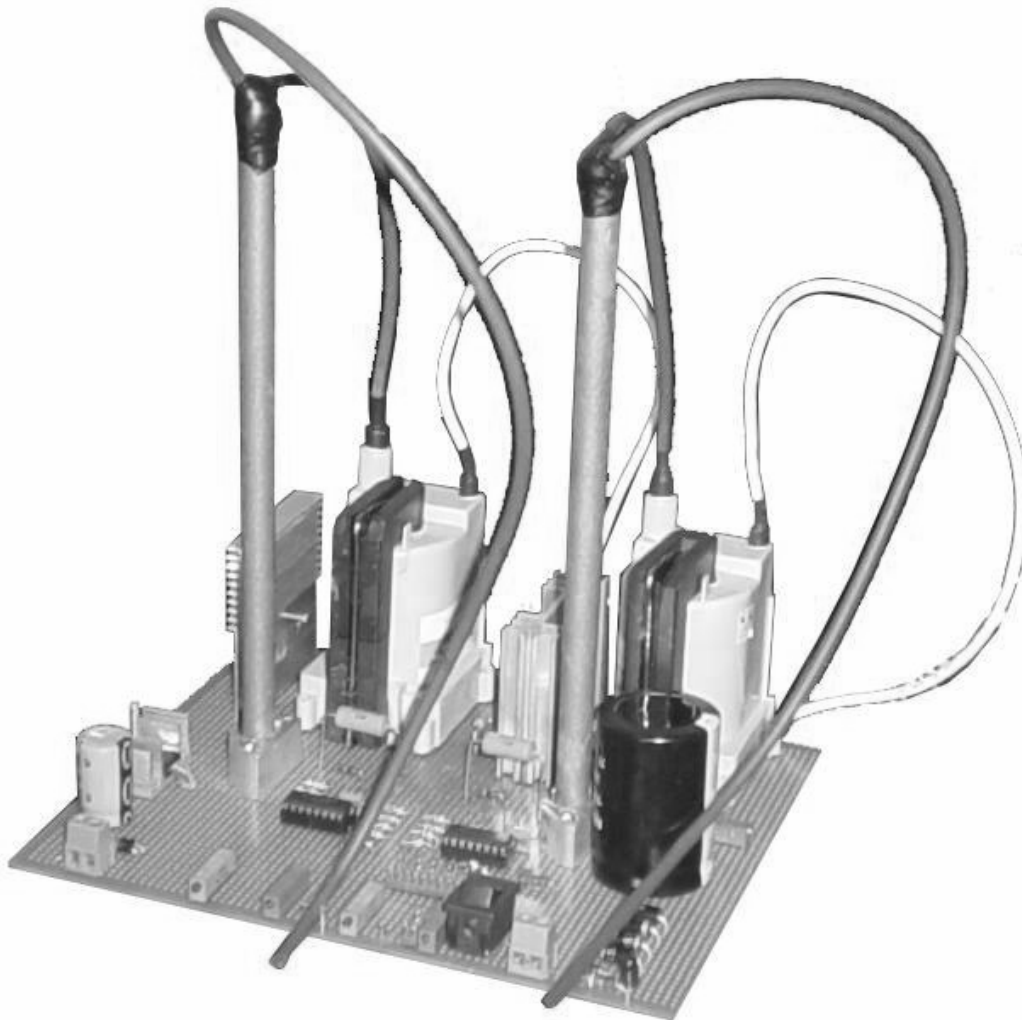


Figura 4.16: Conversor construído para os estágios do filtro eletrostático.

Os diagramas de blocos das fontes de alta tensão para os estágios ionizador e o de coleta de impurezas do filtro eletrostático são mostrados nas figuras 4.8 e 4.10.

Os blocos aritméticos (somador / subtrator) e de comparação, bem como os filtros dos sinais de realimentação e o controlador proporcional integral, foram construídos com circuitos utilizando amplificadores operacionais.

Os blocos *Comparador/Driver* e *Controlador/Driver*, respectivamente, fazem a interface entre sinais contínuos em suas entradas com os pulsos em suas saídas. O modo como estes circuitos trabalham será discutido a seguir.

4.5.1 – Descrição dos blocos do circuito integrado MC44603

Parte das funções dos diagramas de blocos pode ser implementada por circuitos integrados. Procurando por um dispositivo reunindo o máximo das funções necessárias ao controle do conversor, foi selecionado o controlador PWM MC44603.

Este componente, fabricado pela ON Semiconductor, realiza a função de oscilador e de ajuste da largura dos pulsos na saída conforme o sinal aplicado à entrada de controle.

O circuito dispõe ainda de um mecanismo de detecção de desmagnetização do transformador. Estes blocos funcionais serão descritos a seguir.

4.5.1.1 – Oscilador de alta frequência

O circuito utiliza um oscilador dente de serra integrado, ilustrado na Figura 4.17. Os valores da resistência R_{ref} e do capacitor C_T determinam a frequência de oscilação (ajustada no circuito proposto em 20kHz), conforme o gráfico mostrado na Figura 4.18.

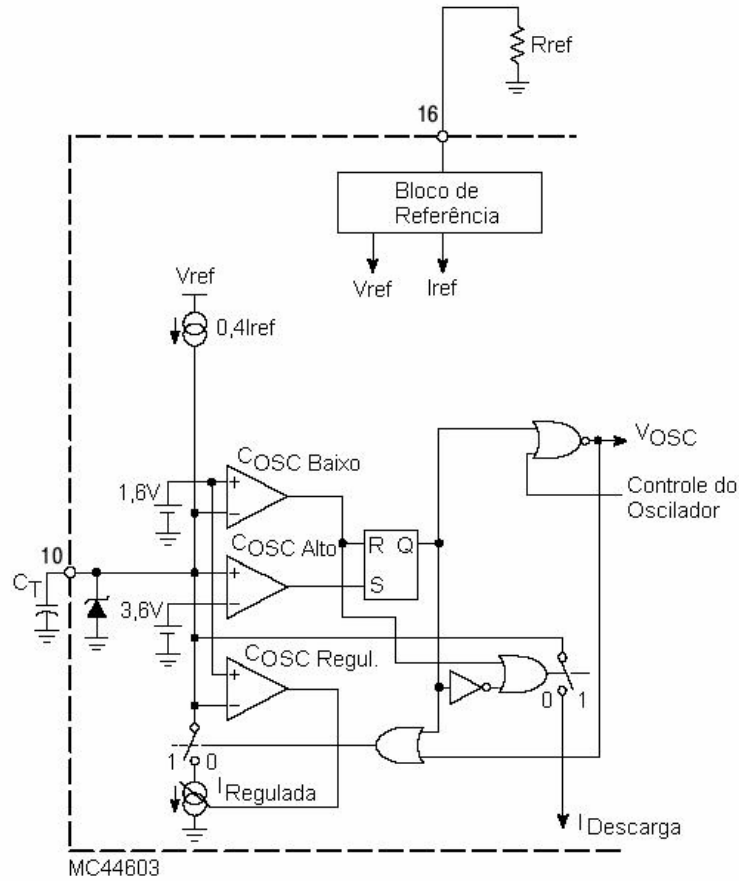


Figura 4.17: Diagrama do circuito oscilador.

O oscilador pode ser controlado de forma a inibir os pulsos no caso de alguma falha do conversor ou mesmo para limitar a largura máxima dos pulsos.

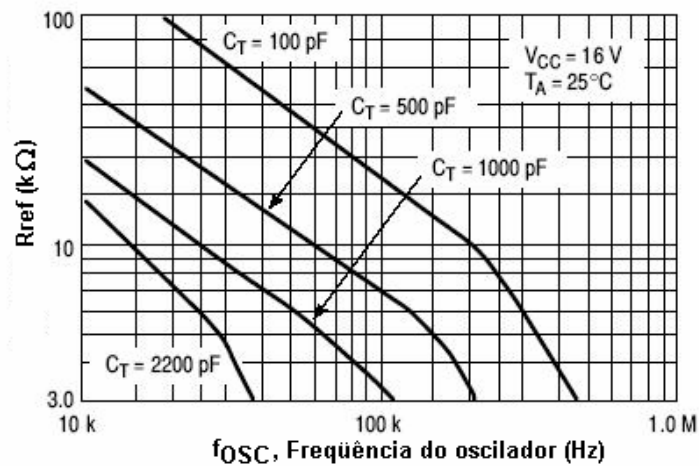


Figura 4.18: Frequência do oscilador em função de R_{ref} e C_T .

4.5.1.2 – Comparador/Driver (Utilizado no conversor do estágio ionizador)

O bloco comparador é um controlador PWM que funciona em conjunto com o oscilador da Figura 4.17. Em condições normais, o pulso na saída é tal que o pino de saída está em nível alto durante a carga do capacitor C_T , e em nível baixo durante a descarga.

A Figura 4.19 ilustra o funcionamento desse controlador PWM. Um comparador de tensão desliga a saída sempre que a tensão no capacitor C_T (que varia entre 1,6V e 3,6V) ultrapassar o valor da soma $V_{\text{pino11}} + 1,6V$.

Assim, com tensão nula no pino 11 do integrado controlador PWM, os pulsos não são gerados. Com 2V neste pino, tem-se a relação cíclica D máxima.

A tensão proveniente do controlador PI da Figura 4.8 é dirigida ao pino 11 de controle. A largura dos pulsos varia neste bloco do sistema de controle de forma a regular a alta tensão de saída em seu valor de referência.

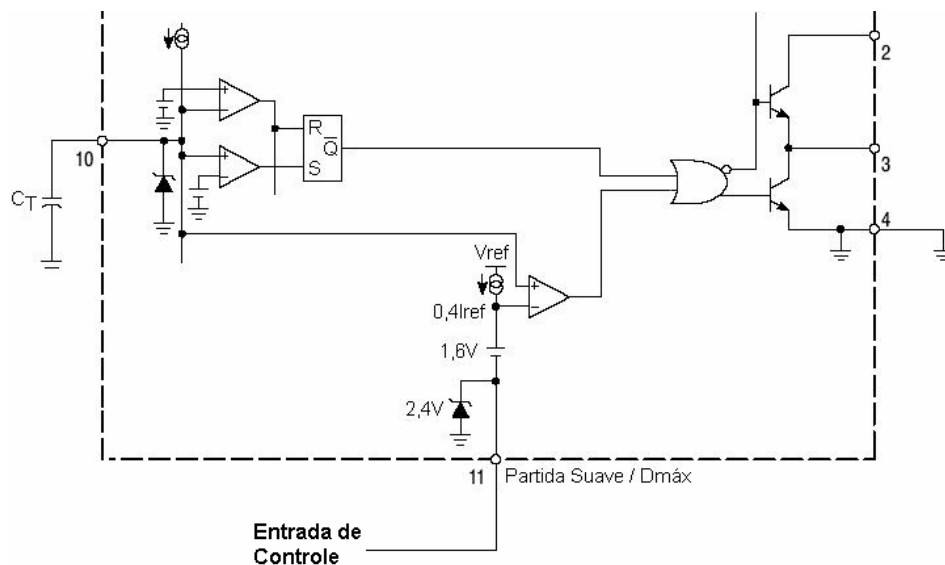


Figura 4.19: Controle PWM pela tensão na entrada de controle.

Uma outra função permitida pelo pino 11 do controlador, é a realização da *partida suave* do conversor flyback, pelo crescimento gradual da tensão de controle ao iniciar o funcionamento da fonte.

A Figura 4.20 ilustra o funcionamento da partida suave do conversor, mostrando também a variação do ciclo de trabalho com a mudança na tensão no pino 11 do controlador.

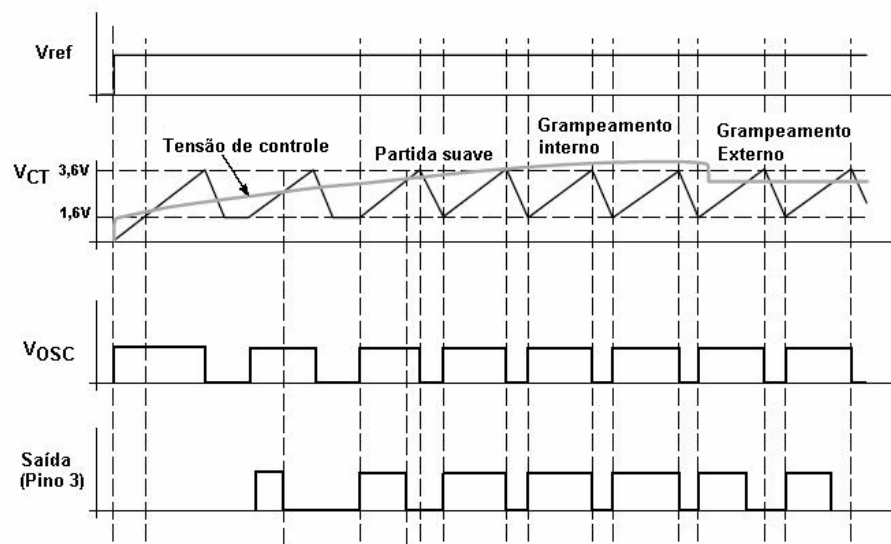


Figura 4.20: Variação do ciclo de trabalho com a tensão de controle.

4.5.1.3 – Controlador/Driver (Utilizado no conversor do estágio coletor de impurezas)

Neste bloco, ilustrado na Figura 4.21, a corrente no transistor é medida por um resistor série R_s . Após passagem por um filtro RC, o sinal de corrente passa por um comparador.

O pulso na saída inicia com o oscilador da Figura 4.17 e termina quando o valor da corrente no transistor ultrapassa o valor ajustado na entrada do comparador.

O valor de pico da corrente representado na entrada do pino 7 do integrado controlador PWM, depende da tensão no pino 13 (onde pode ser ajustada a corrente de referência) e do valor da resistência série R_S utilizada, sendo dado pela aproximação na expressão 4.6.

$$I_{pico(pino7)} \approx \frac{V_{pino13} - 1,4}{3R_S} \quad (4.6)$$

O circuito atua de forma a manter o pico de corrente constante, variando o ciclo de trabalho na saída conforme as condições de carga.

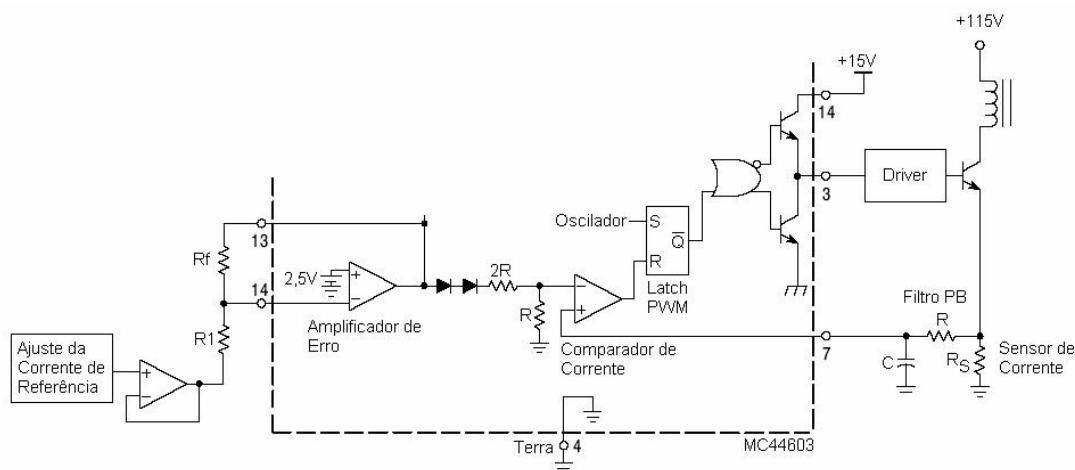


Figura 4.21: Controle PWM pela corrente de pico no transistor.

4.5.1.4 – Circuito de desmagnetização

De forma a não permitir a saturação do transformador, um circuito de desmagnetização foi implementado, que garante a não ocorrência de um novo pulso no transistor enquanto a energia armazenada no transformador não atingir um valor mínimo.

A Figura 4.22 mostra o circuito de desmagnetização implementado. A medida da magnetização foi feita utilizando um enrolamento auxiliar do transformador flyback, cuja tensão foi aplicada na entrada no pino 8 do integrado controlador PWM.

O latch do circuito inibe o oscilador e a saída do circuito enquanto a tensão no enrolamento auxiliar não ficar menor do que 65mV. Quando a energia do transformador for dissipada, o latch deixa de interferir no circuito, e um novo pulso aparecerá na saída no próximo ciclo do oscilador.

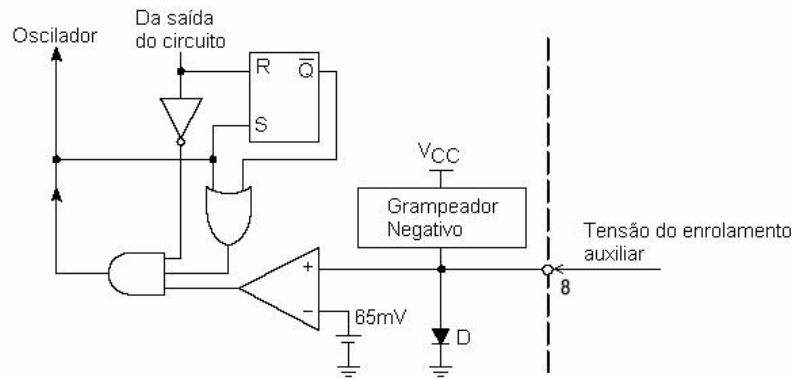


Figura 4.22: Circuito de desmagnetização.

4.6 – Detectores dos pontos críticos de funcionamento do filtro eletrostático

Circuitos comparadores baseados em amplificadores operacionais foram instalados para o ajuste da sinalização de eventos no filtro, como curto-circuito, sobretensão e tensão insuficiente de saída.

A indicação dos eventos sinaliza as condições de operação do equipamento, além de permitir o acionamento de mecanismos externos de limpeza do equipamento.

4.7 – Conclusões

O filtro eletrostático necessita de tensões de alimentação em alta tensão para realizar a ionização e a coleta de impurezas no processo de filtragem.

Dependendo da potência e da tensão de saída desejada, várias topologias de conversores estão disponíveis, cada uma com suas particularidades de construção e de funcionamento.

Para o porte do filtro em estudo, que trabalha com potência inferior a 150W, o conversor flyback atendeu de forma satisfatória.

Os conversores do tipo flyback implementados receberam malhas de controle com características especiais ao estágio em que trabalham. A fonte para o estágio ionizador trabalha com tensão constante de saída, visando manter o corona estável nas diversas condições de carga do filtro. A fonte do estágio de coleta de impurezas trabalha com corrente constante, reduzindo a tensão de saída à medida que o espaço entre as placas coletoras fica mais estreito pelo acúmulo de poluentes. O controle do coletor visa manter o campo elétrico uniforme e constante entre as placas, evitando a ocorrência de arco-voltaico nos pontos de acúmulo de impurezas.

A técnica de medição de alta tensão por meio de divisores resistivos foi apresentada e implementada para os propósitos da pesquisa. Os conversores foram dotados de circuitos de proteção, melhorando a segurança para o seu emprego em alta tensão.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

5.1 – Introdução

Os conversores flyback e as malhas de controle para os estágios ionizador e coletor de impurezas foram implementados e aplicados a um filtro eletrostático real.

Variando enormemente com o tipo de poluente que se deseja filtrar e altamente dependente da geometria e das características mecânicas do filtro, o melhor ou pior funcionamento do sistema com a alta tensão aplicada não é simples de ser traduzido para um valor numérico, pela grande quantidade de variáveis envolvidas.

Entretanto, muitos aspectos marcantes de funcionamento do filtro podem ser facilmente analisados de forma comparativa, variando a estrutura do conversor de alta tensão, e então verificados os ganhos da modificação realizada em relação à situação anterior.

O filtro original funcionava em dois estágios, que acoplados, trabalhavam com tensão única. O filtro proposto trabalha com estágios independentes, com malhas de controle distintas e em separado para os campos elétricos envolvidos no processo de filtragem. Os dois equipamentos foram submetidos identicamente aos testes que seguem, e então comparados, de forma qualitativa.

5.2 – Estrutura para os testes

Uma estrutura adequada deve estar disponível para testar o processo de filtração.

O filtro em estudo tem aplicação em ambiente residencial e comercial, e é utilizado para a retirada de fumaça e gordura do ar. As condições do teste devem ser similares àquelas para a qual o equipamento se destina. A montagem mostrada na Figura 5.1 foi utilizada para os testes no filtro eletrostático..

A fumaça ou gordura gerada durante o uso do fogão a gás é captada por uma coifa, e então levada ao compartimento do filtro.



Figura 5.1: Montagem realizada para os testes de filtração eletrostática.

Os pré-filtros e grades entre a coifa e o filtro tratam da distribuição homogênea do fluxo de ar nos estágios do filtro.

O mecanismo de circulação forçada torna a vazão do ar constante e igual ao valor nominal de projeto do filtro. O ar que passa pelo filtro vai ao duto de saída, por onde a inspeção visual permite verificar a qualidade da filtragem.

5.3 – Os conversores implementados para alta tensão

Os conversores de alta tensão foram ajustados para trabalhar com frequência de chaveamento de 30kHz. A onda dente de serra do oscilador, descrita na seção 4.5.1.1, e os pulsos para o acionamento do transistor, são mostrados nos canais 1 e 2, respectivamente, da Figura 5.2. No canto superior direito, a figura mostra ainda o valor da alta tensão no ionizador do filtro (atenuado em 1000 vezes), com tensão de referência ajustada inicialmente para saída em 7kV.

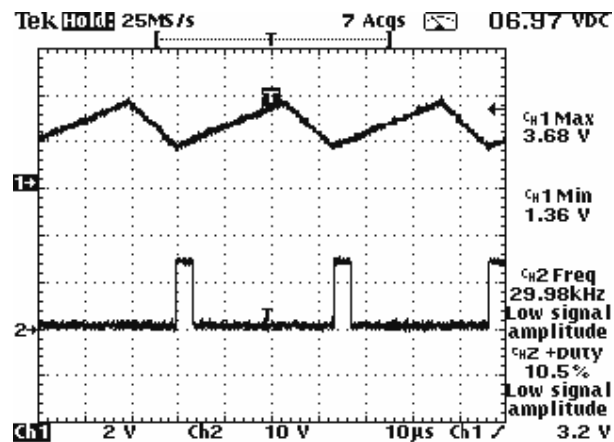


Figura 5.2: (1) Onda dente de serra do oscilador e
(2) Geração de pulsos para o acionamento da chave estática.

A Figura 5.3 mostra nos canais 1 e 2, os pulsos gerados pelo CI MC44603 e a forma de onda da tensão do circuito driver alimentando a base do transistor de saída. Pode-se observar que o circuito driver utiliza tensões positivas e negativas para o acionamento e o corte do transistor. A tensão negativa visa retirar rapidamente a carga armazenada na base, devida aos portadores minoritários, que deve ser removida no corte do transistor [17].

A Figura 5.4 apresenta a forma de onda dos pulsos na chave estática e, no canal 2, a característica triangular da corrente no enrolamento primário do transformador flyback, alimentado com tensão constante durante o pulso. A forma de onda da corrente foi obtida pela tensão sobre um resistor em série com o enrolamento primário do transformador.

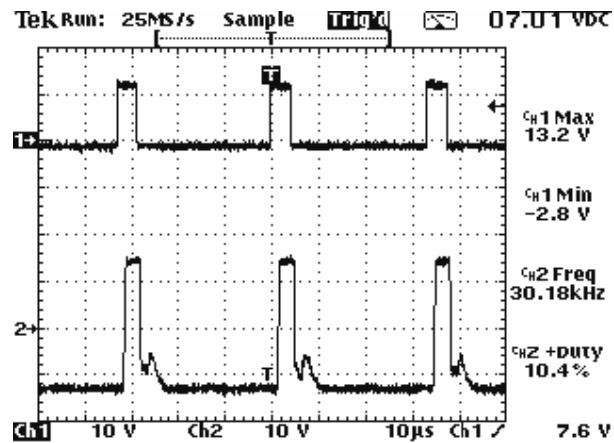


Figura 5.3: (1) Pulsos para o acionamento do transistor e
(2) Tensão de saída do circuito driver.

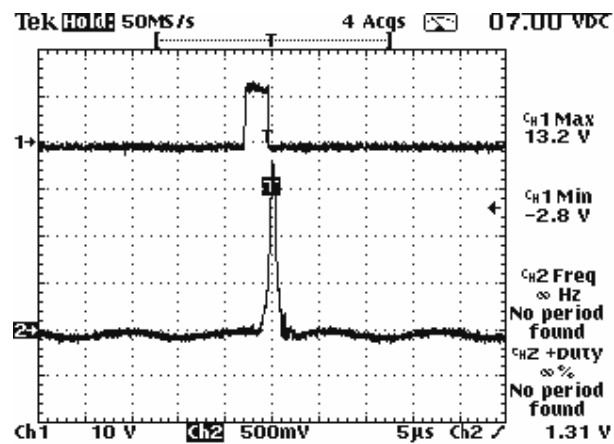


Figura 5.4: (1) Pulsos para o acionamento do transistor e
(2) Tensão sobre um resistor em série com o enrolamento primário do transformador flyback do estágio ionizador.

A tensão de saída no ionizador do filtro eletrostático, medida com uma ponta de prova especial para alta tensão (até 30kV), é praticamente constante e pode ser

vista na Figura 5.6. No canto superior direito, pode ser vista a tensão de 7,02V, medida na saída do atenuador resistivo. A diferença desta leitura na figura com a obtida pela ponta de prova de alta tensão é de 2,31%.

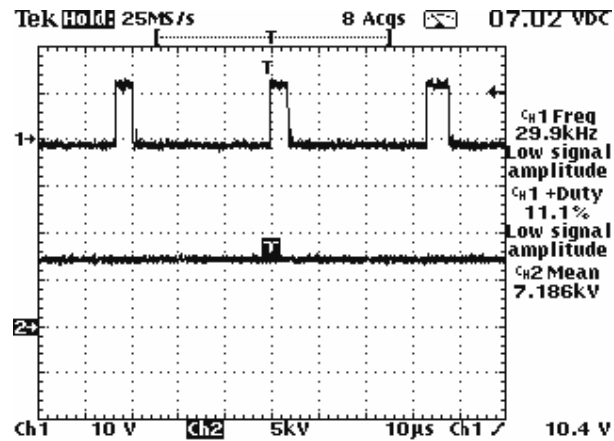


Figura 5.6: (1) Pulsos para o acionamento do transistor e
(2) Alta tensão no ionizador do filtro eletrostático.

A ação do controlador PI no estágio ionizador pode ser vista comparando as figuras 5.6 e 5.7. Nesta última, a tensão de saída foi ajustada para 10kV, resultando em uma maior relação cíclica de trabalho do conversor.

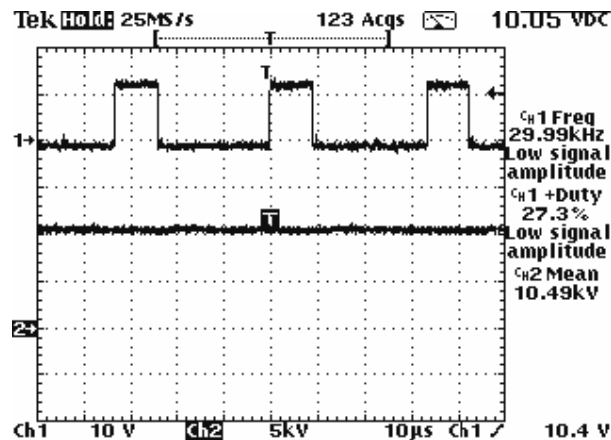


Figura 5.7: (1) Pulsos para o acionamento do transistor
para tensão de saída no ionizador de 10kV.
(2) Alta tensão no ionizador do filtro eletrostático.

No estágio coletor, os picos de corrente são controlados conforme descrito na seção 4.3.3.2. A forma de onda da corrente no enrolamento primário do transformador flyback, medida como a tensão sobre um resistor série, é mostrada na Figura 5.8. Na figura, o pico de corrente foi ajustado de modo a obter uma tensão de saída de 5kV no coletor, na ausência de distúrbios.

A alta tensão de saída do conversor aplicada às placas coletoras é mostrada na Figura 5.9.

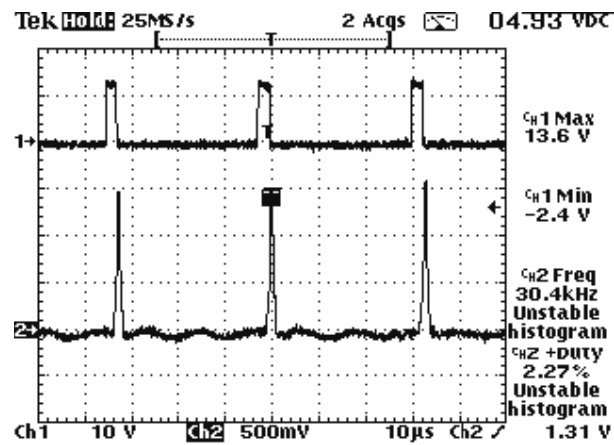


Figura 5.8: (1) Pulsos para o acionamento do transistor para tensão de saída no coletor de 5kV.
 (2) Tensão sobre um resistor em série com o enrolamento primário do transformador flyback do estágio coletor.

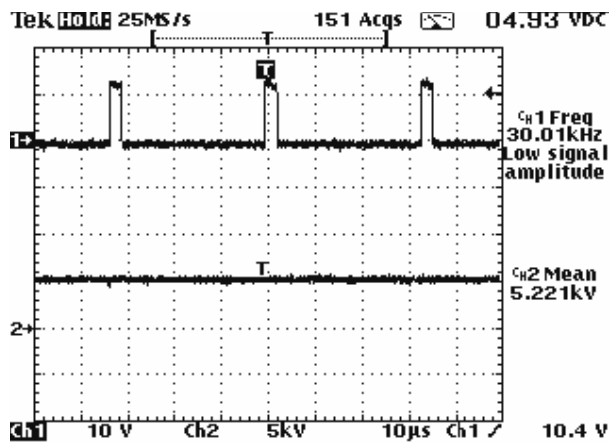


Figura 5.9: (1) Pulsos para o acionamento do transistor para tensão de saída no coletor de 5kV.
 (2) Alta tensão nas placas coletoras do filtro eletrostático.

5.4 – Ligação dos conversores estáticos ao filtro eletrostático

Os conversores de alta tensão implementados foram aplicados aos estágios do filtro eletrostático. Inicialmente, a estrutura mecânica do filtro foi mantida igual (espaçamento entre placas, número de placas, dimensões do equipamento) à original, exceto pelo acoplamento elétrico dos estágios, que foi desfeito.

No estágio coletor, elevando a tensão positiva desde zero, não se percebeu nenhum efeito visual ou sonoro no equipamento até aproximadamente 7kV, quando pôde ser ouvido um chiado na região de borda das placas.

Na região interna entre as placas coletoras, onde o campo elétrico é uniforme, o processo de ionização não ocorre. Entretanto, nas bordas das placas, que têm pequena espessura, existem pontos onde a concentração do campo elétrico pode levar à ionização. Este efeito, dependendo da intensidade, pode ser visível, conforme mostrado na Figura 5.10.

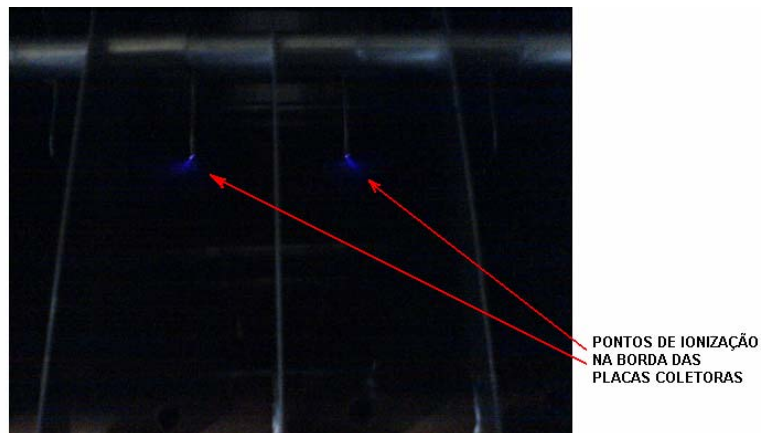


Figura 5.10: Pontos de ionização nas regiões de borda das placas coletoras.

Com o espaçamento original entre as placas coletoras, não foi possível estender a tensão além de 7,5kV, pelo início da ocorrência de arco-voltaico no espaço interno das placas paralelas, conforme mostrado na Figura 5.11.



Figura 5.11: Arco-voltaico no espaço interno das placas coletoras.

No estágio ionizador, o campo de início de corona, calculado para o filtro em teste com a expressão 2-1, foi de 112,5kV/cm. Para atingir esse campo, pela aplicação da expressão 2-3, a tensão aplicada entre os eletrodos deve ser de 6,16kV.

Aumentando a alta tensão positiva desde zero, percebeu-se um chiado após atingir aproximadamente 6kV, quando teve início a ionização em torno do condutor de 0,25mm de diâmetro.

O efeito audível ficou mais intenso a cada novo aumento da alta tensão de saída. Elevando a alta tensão sobre os eletrodos do ionizador, observou-se uma envoltura azulada cobrindo a superfície do condutor de alta tensão, que é característica da descarga corona visual.

A Figura 5.12-a mostra o ionizador do filtro quando não energizado. Na Figura 5.12-b, percebe-se a descarga corona visual com alta tensão aplicada de 12kV. A iluminação do ambiente externo ao filtro foi reduzida para tornar o efeito mais nítido.

Conforme pode ser visto na Figura 5.13, perceberam-se durante os testes, regiões do fio de ionização onde a descarga corona é mais intensa. Essas regiões coincidiram com pontos de menor distância entre o fio corona e a placa plana aterrada adjacente.

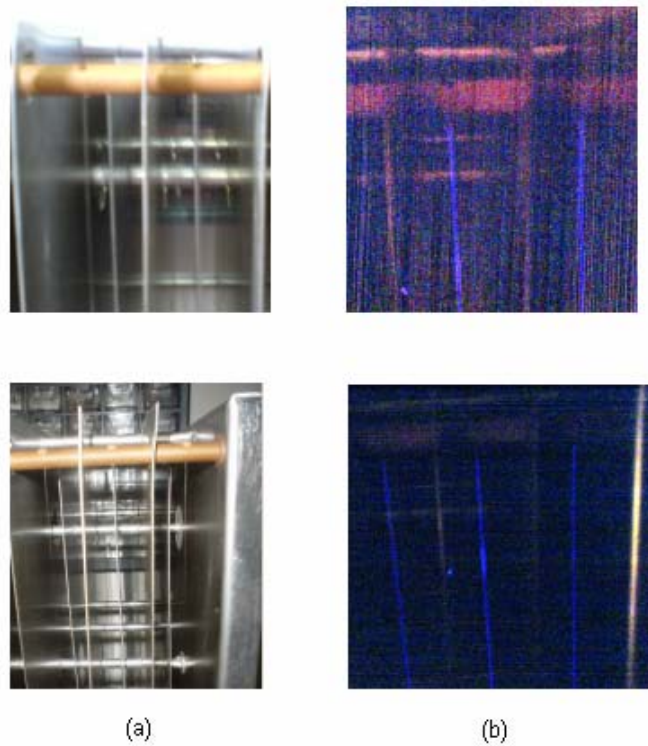


Figura 5.12: Descarga corona visual. (a) Eletrodos em repouso. (b) Eletrodos energizados em alta tensão (12kV).

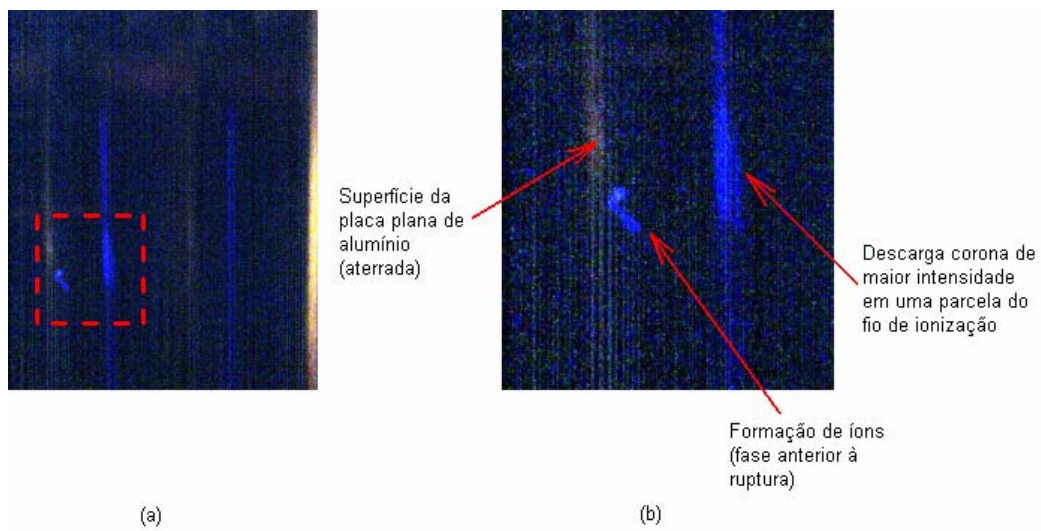


Figura 5.13: Maior intensidade da descarga corona em trecho do fio de ionização. (a) Tamanho normal. (b) Vista ampliada.

Percebeu-se ainda que estes pontos de maior aproximação entre o fio corona e as placas planas são aqueles onde a ruptura do ar ocorre com mais facilidade.

Durante a montagem do estágio ionizador, deve-se cuidar para que os fios fiquem tão equidistantes quanto possível das placas paralelas aterradas.

O filtro original não permitiu a ionização aos níveis da descarga visual. A tensão de ionização ficou restrita à de ruptura entre as placas do estágio coletor, em torno de 7,5kV. Dessa análise, percebe-se que a nova estrutura tem maior flexibilidade e poder de ionização de partículas.

5.5 – Testes de filtragem

O filtro eletrostático original e o modificado (proposto) foram submetidos às mesmas condições de trabalho (vazão de ar e tipo de poluente idênticos) para fins de comparação.

A verificação da filtragem foi feita pela inspeção visual do ar na saída do filtro, verificando-se sua cor e tonalidade, ora com o equipamento ligado, ora desligado.

As fontes de alimentação utilizadas foram ajustadas para cada tipo de poluente, procurando deixar o ar de saída do filtro o mais transparente possível.

5.5.1 – Filtragem de gordura

A Figura 5.14 mostra a geração de fumaça com partículas de gordura para testes do filtro eletrostático.



Figura 5.14: Suspensão de partículas de gordura para testes de filtração eletrostática.

Por inspeção visual, pode ser visto que a filtração com o conversor original funcionou satisfatoriamente até determinado nível de produção de fumaça. Entretanto, variando o volume de poluentes, verificou-se que o ar de saída não ficava totalmente puro, pela tonalidade cinzenta que apresentava. O valor da maior alta tensão obtida em ambos os estágios (mecanicamente acoplados) foi de 7,5kV.

Com os novos conversores aplicados aos estágios desacoplados, percebeu-se que elevando a tensão de ionização até 8kV, o ar de saída ainda não ficou totalmente transparente para nenhum valor da tensão no estágio coletor (desde zero até a tensão de ruptura). Isso demonstrou que, quando a ionização for insuficiente, o coletor de impurezas não pode realizar completamente a sua função.

No teste com gordura, o ar de saída ficou transparente (independente das variações no volume de poluentes) com tensão de ionização de 10kV, com 6kV no estágio coletor. A tensão de ionização foi verificada ser constante, conforme esperado pela ação de controle.

A Figura 5.15-a e 5.15-b mostra o duto de saída de ar com o conversor de alta tensão do filtro desligado e ligado, respectivamente, operando na filtração eletrostática de partículas de gordura.

Na fotografia, a tonalidade do ar de saída com o equipamento ligado se deve ao efeito de condensação, provocada pela diferença entre as temperaturas do ar proveniente do filtro e o do ar ambiente.



Figura 5.15: Verificação visual do processo de filtragem eletrostática de partículas de gordura.
(a) Conversor de alta tensão desligado. (b) Conversor ligado.

5.5.2 – Filtragem de fumaça da queima de partículas de café

Os testes realizados com partículas de gordura foram repetidos para a fumaça proveniente da queima de café. Esta fumaça é sensivelmente menos densa que a de gordura.

A Figura 5.16 mostra a geração de fumaça com partículas de gordura para testes do filtro eletrostático.

O filtro com conversor original não atendeu satisfatoriamente quando o nível de produção de fumaça de café era elevado, demonstrando que esta possui menor sensibilidade à ação eletrostática.

O novo conversor conseguiu a filtragem desejada (deixando o ar de saída transparente) quando a tensão de ionização foi elevada a 12kV. A tensão de 6kV foi mantida no estágio coletor.



Figura 5.16: Suspensão de fumaça, devida à queima de café, para testes de filtração eletrostática.

Este teste demonstrou que o filtro utilizando o novo conversor, pela maior capacidade de ionização de partículas, se adapta melhor aos diversos tipos de poluentes envolvidos no processo de filtração eletrostática.

A Figura 5.17-a e 5.17-b mostra o duto de saída de ar com o conversor de alta tensão do filtro desligado e ligado, respectivamente, operando na filtração eletrostática da fumaça da queima de café.



Figura 5.17: Verificação visual do processo de filtração eletrostática de fumaça de queima de café. (a) Conversor de alta tensão desligado. (b) Conversor ligado.

5.5.3 – Filtragem de fumaça da queima de tecido sintético

Os testes de filtragem realizados para a fumaça proveniente da queima de tecido sintético foram aqueles em que os novos conversores mais se destacaram quando comparados ao original do equipamento.

O filtro com conversor original, apesar de reduzir o nível de poluentes na saída do equipamento, não conseguiu eliminar a fumaça produzida.

O novo conversor conseguiu deixar o ar de saída transparente com tensão de ionização de 12kV. A tensão de 6kV foi mantida no estágio coletor.



Figura 5.18: Verificação visual do processo de filtragem eletrostática de fumaça de queima de tecido sintético. (a) Conversor original. (b) Novos conversores.

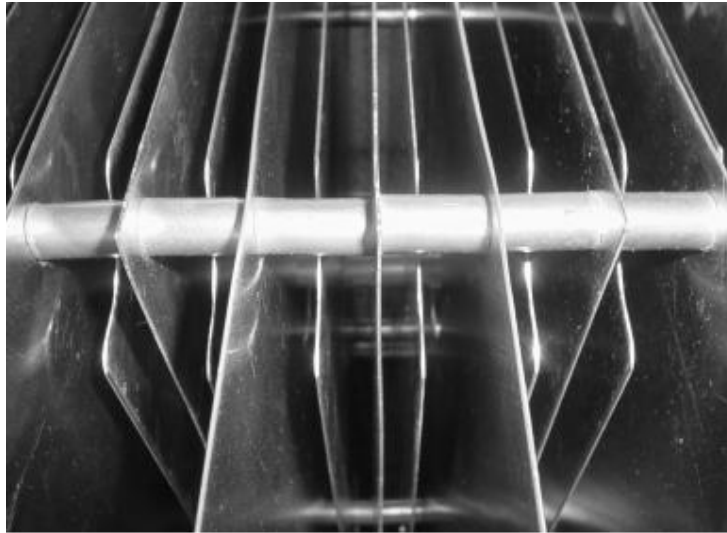
5.6 – Flexibilidade da estrutura mecânica do filtro pelo uso do conversor para estágios separados

Permitindo atuar de forma independente nos campos elétricos dos estágios de ionização e de coleta de impurezas, o filtro adquire maior flexibilidade de alterações em sua estrutura mecânica.

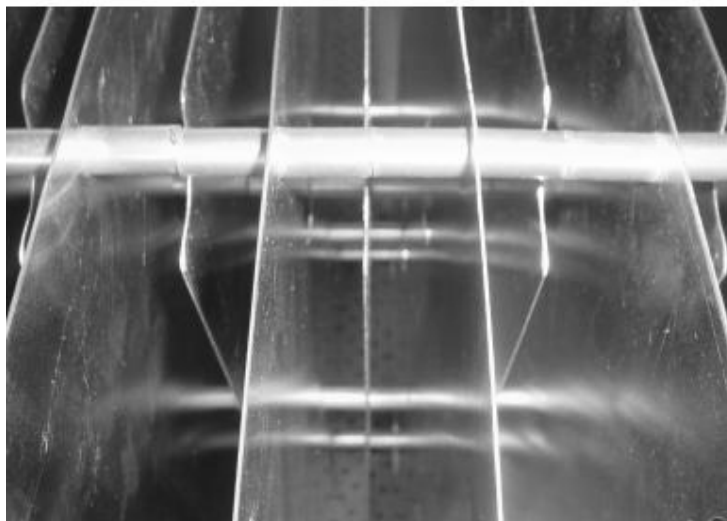
Uma nova alteração foi testada no filtro eletrostático em estudo, dessa vez no espaçamento entre as placas coletoras.

Pelo campo uniforme entre as placas planas paralelas, o aumento do espaçamento pode ser compensado pelo aumento da tensão no estágio coletor.

A modificação mecânica realizada no coletor é mostrada na Figura 5.19-b, na qual o novo espaçamento entre as placas é o dobro do anterior (Figura 5.19-a).



(a)



(b)

Figura 5.19: Modificação no espaçamento das placas do coletor de partículas.

(a) Situação anterior. (b) Coletor modificado.

Novos testes foram realizados com o filtro modificado, mantendo a ionização nos níveis anteriores e aumentando a alta tensão no estágio coletor.

A tensão de ruptura do ar entre as placas aumentou de 7,5kV para 10kV. O aumento dessa tensão não foi proporcional ao aumento da distância entre as placas pela limitação dos isoladores utilizados no filtro.

Nos testes de filtragem, mantendo a tensão de ionização, o ar de saída foi verificado transparente elevando-se a tensão do estágio coletor modificado de 6kV para 8kV.

O resultado da alteração proposta foi a redução significativa do material gasto para a confecção do estágio coletor. As placas retiradas de um único filtro na modificação proposta são mostradas na Figura 5.20.

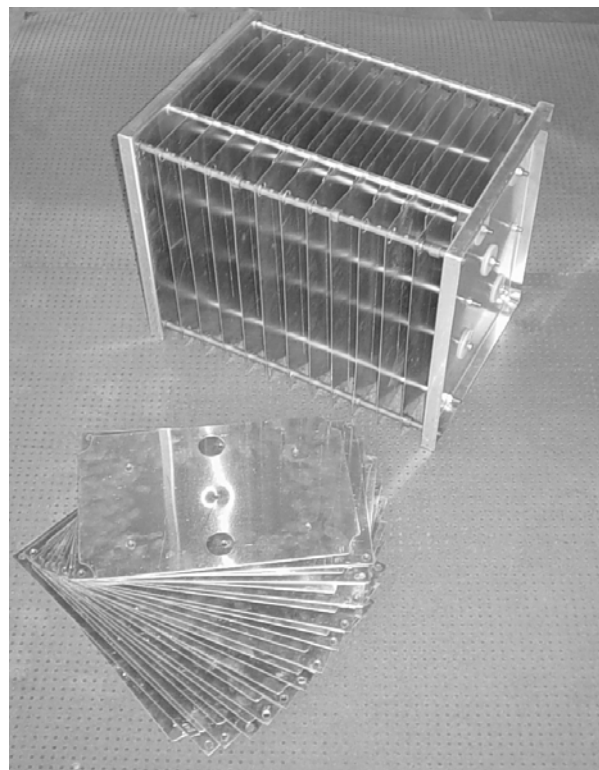


Figura 5.20: Placas retiradas na modificação do espaçamento no estágio coletor de partículas.

A economia proporcionada pela modificação no filtro em estudo pode ser relacionada como segue:

- Redução de 50% na quantidade de placas utilizadas.
- Redução da mão-de-obra de confecção das placas eliminadas.
- Redução da mão-de-obra de montagem do filtro.
- Redução do peso do filtro, facilitando a manutenção.
- Redução de 50% do número de espaçadores utilizados.

A distância entre as placas coletoras não pode ser livremente aumentada, devendo ser mantida pequena em relação às dimensões daquelas placas, conservando a característica uniforme do campo elétrico neste estágio.

5.7 – Conclusões

Neste capítulo, os conversores de alta tensão foram testados no processo de filtragem eletrostática. A estrutura utilizada nos testes foi apresentada e propostas de alteração na estrutura mecânica do filtro utilizado foram feitas.

Os testes foram realizados de forma qualitativa e comparativa em relação à situação encontrada no início da pesquisa.

O filtro utilizando o novo conversor, pela maior capacidade de ionização de partículas, verificada por inspeção visual, se adapta melhor aos diversos tipos de poluentes envolvidos no processo de filtragem eletrostática.

O novo conversor se mostrou mais eficaz e flexível com a separação e controle independente de estágios. O ajuste em separado dos campos elétricos permite ajustar o filtro para trabalhar melhor com determinado tipo de poluente.

A independência dos estágios do filtro permite uma ampla variação na estrutura mecânica do filtro, de modo que seja aliado o menor custo do equipamento ao grau de filtragem desejado.

Capítulo 6

Conclusões finais e propostas de continuidade

6.1 – Conclusões finais

Este trabalho apresentou um estudo sobre filtragem eletrostática, abordando os aspectos elétricos teóricos e práticos dos equipamentos que utilizam este tipo de técnica de remoção de poluentes.

O conhecimento da característica dos campos elétricos necessários ao bom funcionamento de cada etapa do trabalho de filtragem permite ações no intuito de melhorar os processos envolvidos. Nesse sentido, foram propostas e realizadas modificações na estrutura mecânica de um filtro para fumaça e gordura, visando a implementação, com vantagens, de uma nova estrutura de controle.

As alterações mencionadas permitiram o ajuste e a melhoria do campo elétrico nos estágios ionizador e coletor filtro, conforme as características das impurezas que se deseja filtrar e das dimensões mecânicas do equipamento.

A ionização das partículas de impurezas, que para ocorrer adequadamente precisa de corona estável em torno do eletrodo ionizador, foi dotada de um sistema de controle que mantém a alta tensão constante para as várias condições de carga que ocorrem no funcionamento do filtro.

O estágio coletor de impurezas, por sua vez, recebeu um controle baseado em corrente. Essa implementação permitiu reduzir gradativamente e de forma automática, a tensão entre placas paralelas à medida que os poluentes vão sendo depositados sobre estas placas. O efeito imediato foi a redução das condições ocorrência de arco-voltaico no espaço entre placas, já que o estreitamento do canal devido ao acúmulo de poluentes é compensado pela devido ajuste no campo elétrico envolvido.

A redução gradual do campo para a coleta de impurezas também permitiu a extensão do período de funcionamento do filtro, já que o campo elétrico vai se adequando às novas condições de impregnação de poluentes nas placas coletoras.

As malhas de controle implementadas proporcionaram então, a manutenção das melhores características dos processos elétricos envolvidos durante o período de operação do filtro.

Várias topologias de conversores para operação em alta tensão estão disponíveis. O conversor flyback, pela baixa potência requerida no filtro estudado, atendeu satisfatoriamente à aplicação deste trabalho.

Este trabalho abordou também detalhes de medição de alta tensão importantes na realização das malhas de controle do filtro.

Os testes de filtragem mostraram que o filtro operando com as malhas de controle propostas atingiram resultados de filtragem melhores do que os apresentados no filtro original.

O controle em separado dos campos elétricos permitiu ainda a flexibilização da estrutura mecânica do filtro, onde foi obtido e comprovado o bom funcionamento do equipamento com metade da quantidade de placas coletoras do filtro original. A contribuição resultou em um filtro de menor peso e custo de fabricação.

6.2 – Propostas de continuidade

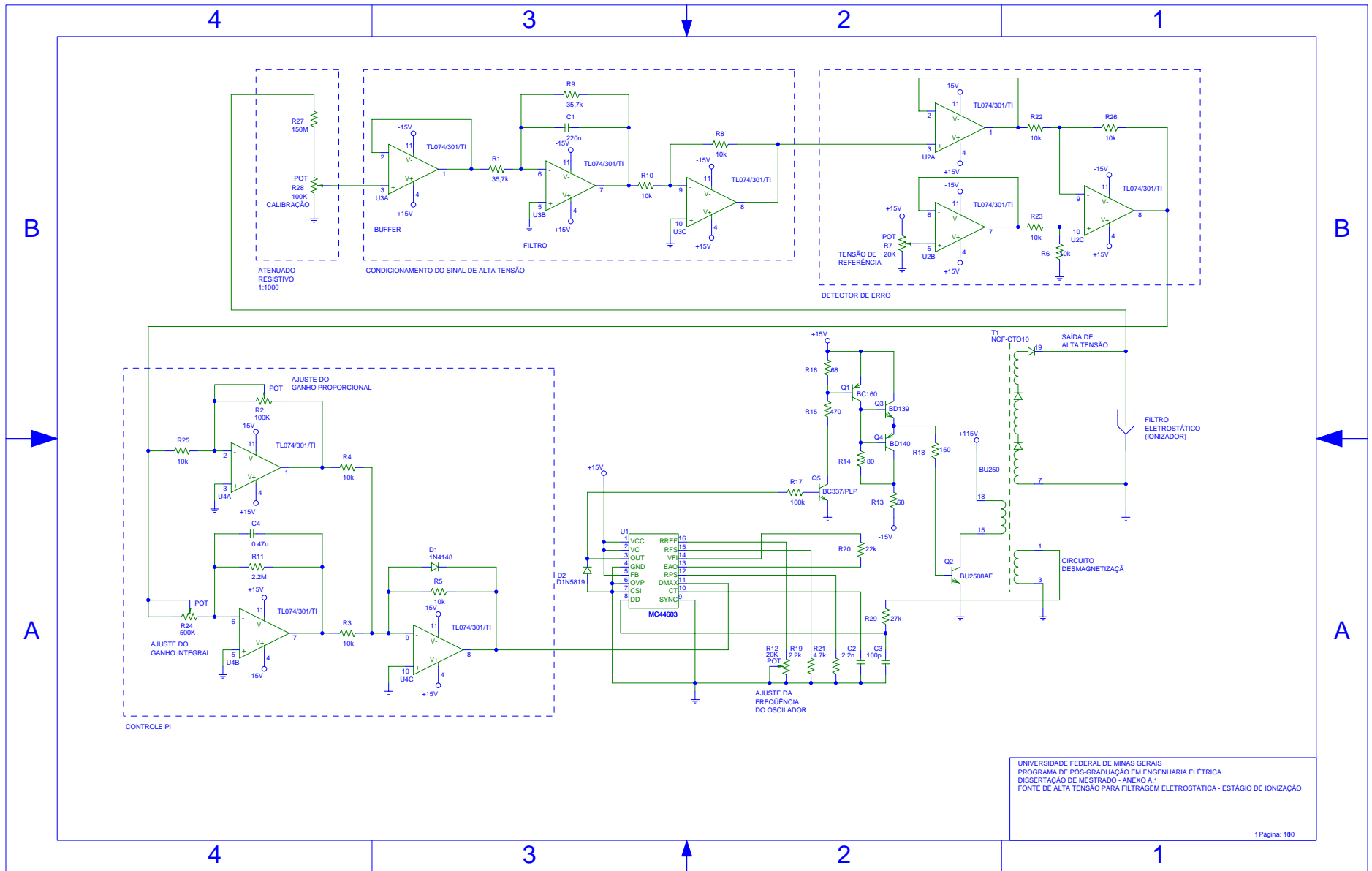
Pelas necessidades que as questões ambientais impõem para a conservação e melhoria da qualidade do ar no planeta, o desenvolvimento desta técnica de filtragem podem fazer com que seja utilizada em aplicações onde ainda não é empregada. As propostas de continuidade para complementar este trabalho são:

- Fazer medições prolongadas na filtragem de poluentes utilizando os métodos deste trabalho, permitindo a obtenção de resultados quantitativos.
- Realizar o controle digital microprocessado das malhas de controle propostas para o filtro eletrostático, permitindo o melhor tratamento do conversor aos eventos que ocorrem no processo, atuando efetivamente no controle de arco-voltaico e na segurança para o trabalho de alta tensão.
- Criar uma interface homem-máquina amigável, permitindo ao operador conhecer e atuar sobre as condições de funcionamento do filtro.
- Realizar um processo de auto-lavagem do filtro, controlado pelas condições de operação, aumentando a sua autonomia de funcionamento.

Anexo A

Conversor para o estágio ionizador

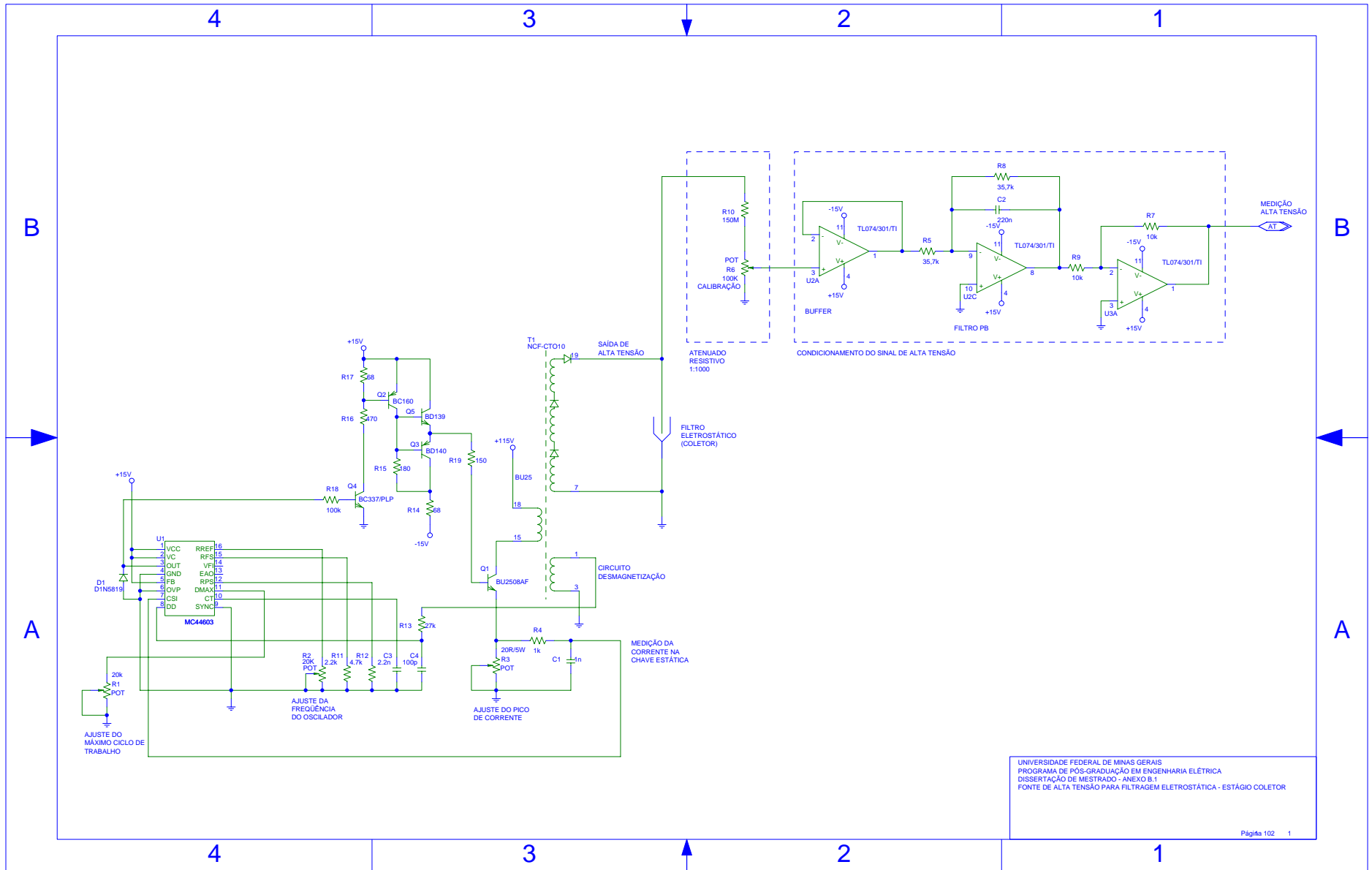
Diagrama esquemático



Anexo B

Conversor para o estágio coletor

Diagrama esquemático



Anexo C

Obtenção da Função de Transferência do Conversor Flyback

Seja a figura C.1 [11]:

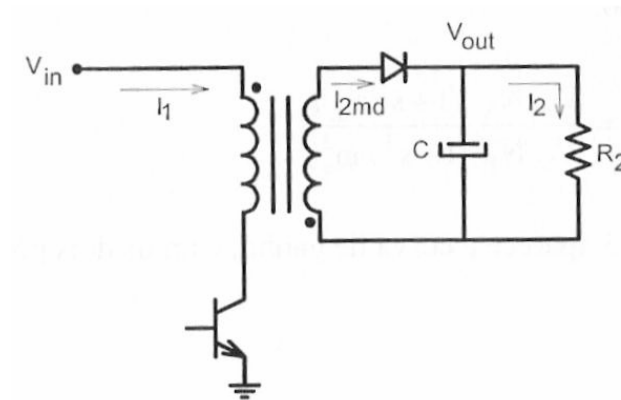


Figura C.1: Esquema básico de um conversor flyback [11].

V_{in} : Tensão contínua na entrada do conversor.

V_{out} : Tensão de saída do conversor.

I_1 : Corrente no enrolamento primário.

I_2 : Corrente no enrolamento secundário.

I_{2md} : Corrente média no enrolamento secundário.

A potência média ideal (P_{2md}) na saída do conversor é dada pela expressão C.1.

$$P_{2md} = R_2 I_{2md}^2 \quad (C.1)$$

O crescimento da corrente na entrada do conversor é ilustrado na figura C.2. O valor de pico da corrente (I_P) é encontrado pela integração do valor da tensão de entrada desde o tempo zero até T_1 , conforme as expressões C.2 e C.3.

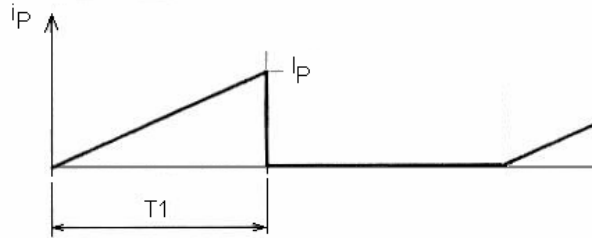


Figura C.2: Crescimento da corrente no enrolamento primário do transformador flyback durante o intervalo T_1 [11].

$$I_P = \frac{1}{L} \int_0^{T_1} V_{in} dt = \frac{V_{in} T_1}{L} = \frac{V_{in} D}{fL} \quad (C.2)$$

Onde:

T_1 : Intervalo ligado da chave estática em um ciclo.

D : Relação cíclica de trabalho do conversor.

f : Frequência de chaveamento.

O valor médio da corrente na entrada (I_{1md}) do conversor é:

$$I_{1md} = \frac{I_P T_1}{2T} = \frac{I_P D}{2} \quad (C.3)$$

Onde:

T : Período do sinal de chaveamento.

I_P : Valor de pico da corrente na entrada do conversor.

A potência média na entrada é dada por:

$$P_{1md} = V_{in} I_{1md} = \frac{V_{in} I_P T_1}{2T} \quad (C.4)$$

Combinando as expressões C.2 e C.3, temos:

$$P_{1md} = \frac{V_{in}^2 T_1^2}{2LT} \quad (C.5)$$

Desprezando as perdas e considerando as potências de entrada e de saída iguais:

$$P_{2md} = P_{1md} \quad (C.6)$$

$$R_2 I_{2md}^2 = \frac{V_{in}^2 T_1^2}{2LT} \quad (C.7)$$

Isolando o valor da corrente média de saída:

$$I_{2md}^2 = \frac{V_{in}^2 T_1^2}{2L R_2 T} \quad (C.8)$$

Multiplicando o numerador e o denominador da expressão C.8, e rearranjando os termos, temos:

$$I_{2md}^2 = \frac{V_{in}^2 T_1^2 T}{2L R_2 T} = \frac{V_{in}^2}{2L R_2} \left(\frac{T_1}{T} \right)^2 \left(\frac{1}{f} \right) \quad (C.9)$$

$$I_{2md} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2L R_2} f} D \quad (C.10)$$

De posse da expressão para a corrente I_{2md} , o estágio de saída do conversor, que tem característica de fonte de corrente, passa a ser representado pela Figura C.3, cuja equação diferencial é dada pela expressão C.11.

$$I_{2md} = C \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2} \quad (C.11)$$

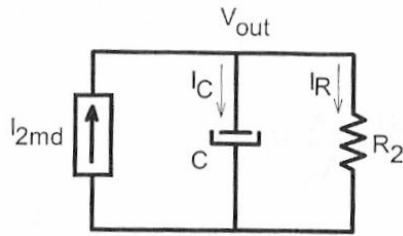


Figura C.3: Representação do estágio de saída do conversor flyback [11].

Combinando as expressões C.10 e C.11, resulta:

$$\frac{V_{in}}{C\sqrt{2LR_2}f} D = \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2C} \quad (C.12)$$

A relação cíclica de trabalho pode ser expressa em função da tensão de controle V_C que determina a largura dos pulsos no transistor do conversor. A Figura C.4 mostra a forma de onda triangular (com valor de pico V_S) que, comparada com o valor V_C , dá origem aos pulsos.

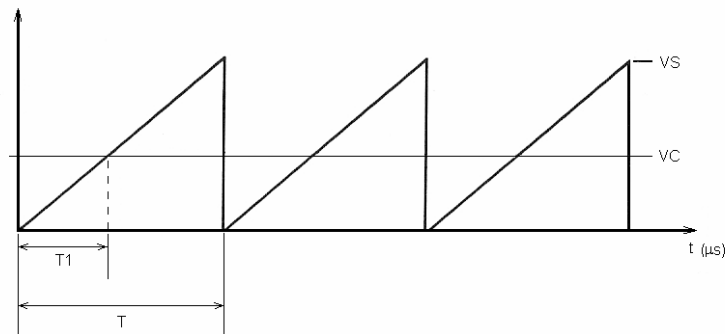


Figura C.4: Onda triangular comparada a V_C para originar os pulsos no transistor [11].

O valor da relação cíclica de trabalho pode ser escrito como:

$$D = \frac{V_C}{V_S} \quad (C.13)$$

Onde:

V_C : Tensão para controle da largura dos pulsos de chaveamento.

V_s : Tensão de pico da onda triangular do gerador de pulsos de chaveamento.

Definindo uma constante A como:

$$A = \frac{V_{in}}{C\sqrt{2LR_2f}} \quad (C.14)$$

Pode-se reescrever a expressão C.14 como:

$$\frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2C} = A \frac{V_C}{V_s} \quad (C.15)$$

Aplicando a Transformada de Laplace à expressão C.15, temos:

$$sV_{out}(s) + \frac{V_{out}(s)}{R_2C} = \frac{A}{V_s}V_C(s) \quad (C.16)$$

Rearranjando a expressão C.16 de forma que a expressão $G(s)$ relacione a tensão de saída à de controle, temos:

$$V_{out}(s)[sR_2C + 1] = \frac{AR_2C}{V_s}V_C(s) \quad (C.17)$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} = \frac{AR_2C}{V_s} \frac{1}{(1 + sR_2C)} \quad (C.18)$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} = \frac{V_{in}R_2C}{CV_s\sqrt{2LR_2f}} \frac{1}{(1 + sR_2C)} \quad (C.19)$$

Definindo a função de transferência do conversor flyback como a relação entre a tensão de saída e a tensão de controle da relação cíclica de trabalho do conversor, obtemos a expressão C.20.

$$G(s) = \frac{V_{in}}{V_s \sqrt{\frac{2Lf}{R_2}}} \frac{1}{(1 + sR_2C)} \quad (C.20)$$

A expressão C.20 é a função de transferência do conversor flyback, que revela duas características importantes do conversor [11]:

- Trata-se de um sistema de primeira ordem, apresentando portanto, um único pólo na função de transferência, simples de ser estabilizado.
- O ganho estático, ou de regime permanente, depende da resistência de carga.

Anexo D

Estudo do Transformador Flyback

D.1 - Cálculo do núcleo do transformador flyback

A seguir, serão obtidos os modelos para o cálculo do núcleo do transformador para a fonte do tipo flyback [11].

Seja a Lei de Faraday:

$$V_{in} = N_p A_e \frac{dB}{dt} \quad (D.1)$$

Onde:

N_p : Número de espiras do primário.

A_e : Área da seção transversal do núcleo.

B : Densidade de fluxo magnético.

Sendo T_1 o intervalo no período T no qual o transistor fica ligado, podemos fazer:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\Delta B}{T_1} \quad (D.2)$$

Combinando as expressões D.23 e D.24, temos:

$$V_{in} = \frac{N_p A_e \Delta B}{T_1} = \frac{N_p A_e \Delta B f}{D} \quad (D.3)$$

Onde:

D: Relação cíclica de trabalho do conversor.

f: Frequência de chaveamento.

Rearranjando a expressão D.3 para obter A_e , fica:

$$A_e = \frac{D_{\max} V_{in}}{N_p \Delta B f} \quad (D.4)$$

Definindo os parâmetros:

A_p : Área ocupada pelo enrolamento primário.

K_p : Fator de utilização de cada camada do enrolamento primário.

A_w : Área da janela do núcleo.

K_w : Fator de utilização da área do enrolamento.

Temos que a área ocupada pelo enrolamento primário é dada por:

$$A_p = K_p K_w A_w \quad (D.5)$$

A relação entre a corrente eficaz no primário e a densidade de corrente no condutor pode ser expressa como na expressão D.6.

$$N_p I_{pef} = A_p J \quad (D.6)$$

Onde:

J: densidade de corrente no condutor.

I_{pef} : Valor eficaz da corrente no primário.

A expressão D.5 é então combinada com a D.6, e reescrita na D.8 para obter a expressão que determina a área da janela do núcleo A_w .

$$A_p = \frac{N_p I_{Pef}}{J} = K_p K_w A_w \quad (D.7)$$

ou

$$A_w = \frac{N_p I_{Pef}}{K_p K_w J} \quad (D.8)$$

Com as relações anteriores, obtém-se o produto $A_e A_w$ do núcleo, rearranjada na expressão D.10.

Então:

$$A_e A_w = \frac{V_{in} D_{máx}}{N_p \Delta B f} \frac{N_p I_{Pef}}{K_p K_w J} \quad (D.9)$$

$$A_e A_w = \frac{V_{in} D_{máx} I_{Pef}}{K_p K_w J \Delta B f} \quad (D.10)$$

A corrente eficaz no transistor pode ser determinada conforme a seguir:

$$I_{efT} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} \left(\frac{V_{in}}{L} t \right)^2 dt} = \frac{V_{in}}{fL} \sqrt{\frac{D^3}{3}} \quad (D.11)$$

Com as expressões D.3 e D.33, obtém-se:

$$I_{Pef} = I_p \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (D.12)$$

Rearranjando a equação C.3 (Anexo C), obtém-se a expressão D.13.

$$I_p = \frac{2I_{md}}{D} \quad (D.13)$$

A expressão da corrente eficaz no enrolamento primário do transformador fica como segue:

$$I_{Pef} = I_{md} \sqrt{\frac{4}{3D_{m\acute{a}x}}} \quad (D.14)$$

Levando a expressão D.14 em D.10, obtém-se:

$$A_e A_w = \frac{V_{in} I_{md}}{K_p K_w J \Delta B f} \sqrt{\frac{4}{3} D_{m\acute{a}x}} \quad (D.15)$$

A potência de entrada do conversor, relacionada ao rendimento fica:

$$P_{in} = V_{in} I_{md} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (D.16)$$

Onde:

η : Rendimento da fonte.

P_{out} : Potência de saída

P_{in} : Potência de entrada.

Sejam as seguintes unidades:

P_{out} [W]: Potência de saída.

J [A/cm²]: Densidade de corrente.

f [Hz]: Frequência de comutação.

B [T]: Variação de fluxo eletromagnético.

$A_e A_w$ [cm⁴]: Parâmetro para seleção do núcleo do transformador.

Levando a expressão D.16 em D.15, resulta:

$$A_e A_w = \frac{P_{out} 10^4}{\eta K_p K_w J f \Delta B} \sqrt{\frac{4}{3} D_{m\acute{a}x}} \quad (D.17)$$

A Figura D.1 ilustra fisicamente os parâmetros A_e e A_w de um núcleo de transformador do tipo EE. O produto $A_e A_w$ determina os requisitos mínimos do núcleo a ser utilizado no conversor.

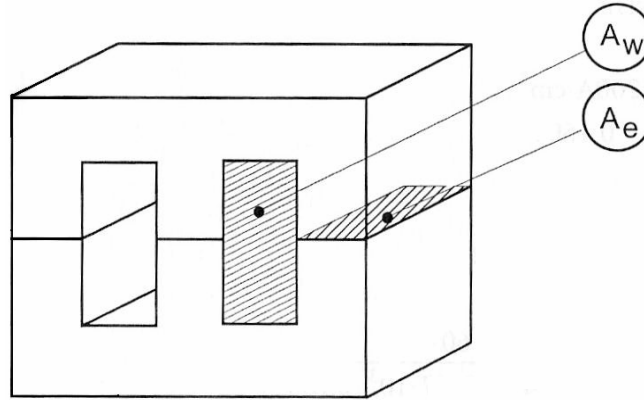


Figura D.1: Parâmetros A_e e A_w de um núcleo EE [11].

D.2 – Bitolas dos condutores

A bitola dos condutores S a utilizar depende da corrente eficaz I_{ef} e da densidade de corrente J de cada enrolamento, conforme na expressão D.40. Uma tabela apropriada de capacidade de corrente para condutores pode ser utilizada.

A escolha correta do condutor é importante para minimizar as perdas e o aquecimento do transformador durante a sua operação.

$$S = \frac{I_{ef}}{J} \quad (D.18)$$

D.3 – Cálculo do entreferro

A figura C.2 (Anexo C) esboça a corrente no enrolamento primário do transformador durante o período de condução do transistor. A energia armazenada no indutor no intervalo T_1 é dada pelas expressões D.19 e D.20.

$$\Delta W = \frac{1}{2} L I_p^2 \quad (D.19)$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} B H V \quad (D.20)$$

Onde:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (\text{D.21})$$

$$V = A_e \delta \quad (\text{D.22})$$

ΔW [J]: Energia na indutância do enrolamento primário do transformador

H : [A/m]: Intensidade de campo magnético.

V [m³]: Volume do entreferro.

δ [m]: Entreferro do transformador.

μ_0 : Permeabilidade do vácuo ($4\pi 10^{-7}$ H/m).

Levando as expressões D.21 e D.22 à D.20, resulta:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A_e \delta \quad (\text{D.23})$$

Rearranjando a expressão D.23, obtém-se a expressão para o cálculo do entreferro [11]:

$$\delta = \frac{2\mu_0 \Delta W}{B^2 A_e} \quad (\text{D.24})$$

D.4 – Determinação do enrolamento primário

A relação entre a densidade de fluxo no transformador e a corrente no primário com o número de espiras do enrolamento, com B em *Gauss* e δ em *centímetros*, é dada pela expressão D.25 [11].

$$N_p = \frac{B \delta}{0,4\pi I_p} \quad (\text{D.25})$$

Onde:

I_p : Valor de pico da corrente na entrada do conversor.

D.5 – Determinação do enrolamento secundário

O cálculo do enrolamento secundário do transformador flyback envolve, além da relação de transformação, o máximo ciclo de trabalho utilizado.

Operando em condução descontínua, pode-se dividir o período de operação do conversor em três intervalos:

- T_1 : O transistor conduz e o transformador armazena energia.
- T_2 : O transistor é cortado, o diodo conduz e a energia armazenada do transformador é transferida para a saída do conversor.
- T_3 : Período morto, após a desmagnetização do transformador.

Para assegurar a desmagnetização, o tempo T_2 mínimo deve ser assegurado para satisfazer a expressão D.26.

$$V_S \frac{N_P}{N_S} T_2 = V_P T_1 \quad (\text{D.26})$$

O pior caso é aquele em que o período T_3 é nulo, ou seja, aquele em que o conversor inicia a operação em modo de condução contínua.

$$T_2 = T - T_{1máx} \quad (\text{D.27})$$

Levando a expressão D.27 em D.26, temos:

$$V_S \frac{N_P}{N_S} (T - T_{1máx}) = V_P T_{1máx} \quad (\text{D.28})$$

A expressão D.28 pode ser reescrita em função da relação cíclica de trabalho:

$$V_S \frac{N_P}{N_S} (1 - D_{máx}) = V_P D_{máx} \quad (\text{D.29})$$

A partir da expressão D.29, considerando que a tensão no enrolamento secundário é igual à tensão de saída somada à queda de tensão no diodo (expressão D.30), obtém-se a fórmula para o cálculo do número de espiras do secundário do transformador (expressão D.31) [11].

$$V_S = V_{out} + V_F \quad (D.30)$$

$$N_S = N_P \frac{(V_{out} + V_F)(1 - D_{m\acute{a}x})}{V_P D_{m\acute{a}x}} \quad (D.31)$$

Quando o transformador flyback possuir múltiplas saídas, a expressão D.31 deve ser empregada para cada saída.

Referências Bibliográficas

[1] Parker, K. R. “APPLIED ELECTROSTATIC PRECIPITATION”, Blackie Academic & Professional, New York, 1996.

[2] NATIONAL AIR FILTRATION ASSOCIATION – “Nafa Guide to Air Filtration” – Washington, D.C., 1993.

[3] Rose, H. E. and Wood, A. J. “An introduction to electrostatic precipitation in theory and practice”, Constable, London, 1956.

[4] Kuffel, E., Zaengl, W. S. and Kuffel, J. “High voltage engineering: fundamentals”, Newnes, Oxford, 2000.

[5] TUMA INDUSTRIAL, Manual de Filtros Eletrostáticos, Belo Horizonte, 2005.

[6] Resnick, Robert e Halliday, David. “Física: Volume 3”, Livros Tecnicos e Cientificos, Rio de Janeiro, 1984.

[7] Hayt Jr., William H. “Eletromagnetismo”, 4ed, Livros Tecnicos e Cientificos, Rio de Janeiro, 1994.

[8] Grass, Norbert, Hartmann, Werner and Klöckner, Michael. “Application of different types of high-voltage supplies on industrial electrostatic precipitators”. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 40, nº 6, pages 1513-1520, Nov.-Dec. 2004.

- [9] Sun, J., Ding, X, Nakaoka, M. and Takano, H. “Series resonant ZCS-PFM DC-DC converter with multistage rectified voltage multiplier and dual-mode PFM control scheme for medical-use high-voltage X-ray power generator”. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, Vol. 147, n° 6, pages 527-534., Nov. 2000.
- [10]. Erickson, W. Robert, “Fundamentals of Power Electronics”, University of Colorado, Chapman & Hall, Boulder, Colorado, 1997.
- [11] Barbi, Ivo. “Projetos de fontes chaveadas”, Edição do Autor, Florianópolis, 2001.
- [12]. Ogata, Katsuhiko, “Engenharia de Controle Moderno”, 4ª. Edição, Prentice Hall, São Paulo, 2003.
- [13] Katancevic, Aleksandar R. “HV electric field effects”. *High Voltage Engineering* , HELSINKI UNIVERSITY of TECHNOLOGY, 2001.
- [14] Peraça, Mauro Tavares. “Conversores CC-CC elevadores para aplicação em equipamentos de refrigeração”, Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2002.
- [15] Parker, K. R. “Improving electrostatic precipitator performance for power stations”, *Power Engineering Journal*, Vol. 11, n° 4, pages 169-176, August of 1997.
- [16] McLean, K. J. “Electrostatic precipitators”, *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A*, Vol. 135, n° 6, pages 347-361, July 1988.
- [17] Sedra, Adel S. e Smith, Kenneth C. “Microeletrônica”, 4ª. Edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2000.