

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

Conversor para Pulsos Elétricos de Alta Tensão, de  
curta duração, para Processos de Geração de  
Ozônio.

**Alejandro Hincapié Baena**

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia – UNESP –  
Campus de Ilha Solteira, como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de conhecimento: Automação.

Ilha Solteira  
2014

---

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

H659c Hincapié Baena, Alejandro.  
Conversor para pulsos elétricos de alta tensão, de curta duração, para processos de geração de ozônio. / Alejandro Hincapié Baena. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
138 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Carlos Alberto Canesin  
Inclui bibliografia

1. Conversão e retificação da energia elétrica. 2. Circuitos elétricos, magnéticos e eletrônicos. 3. Circuitos eletrônicos.

---

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



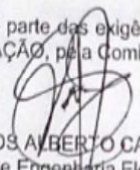
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

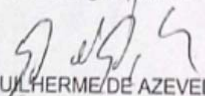
**TÍTULO:** Conversor para Pulsos Elétricos de Alta Tensão, de curta duração, para Processos de Geração de Ozônio

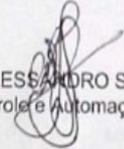
**AUTOR:** ALEJANDRO HINCAPIÉ BAENA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. GUILHERME DE AZEVEDO E MELO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES  
Engenharia de Controle e Automação/ UNESP, Câmpus Experimental de Sorocaba

Data da realização: 20 de março de 2014.

## RESUMO

Este trabalho apresenta, analisa e implementa uma proposta de conversor para geração de pulsos elétricos de alta tensão para aplicação na produção de ozônio e injeção do mesmo em água, com a finalidade de ação germicida e bactericida para processos de lavagem e higienização industrial.

O conversor proposto é composto por dois estágios, sendo o primeiro estágio um retificador Boost operando no Modo de Condução Descontínua (MCD), responsável pela obtenção de um barramento em Corrente Contínua (CC) regulado e, atuando como seguidor de tensão da entrada apresenta um elevado fator de potência com reduzida distorção harmônica para a corrente de entrada; o segundo estágio consiste no uso de um inversor em Ponte Completa (Full-bridge) ressonante com controle por deslocamento de fase (Phase-shift), frequência constante (em torno de 10kHz) e modulação bipolar. O estágio inversor ressonante é composto pelo inversor em ponte associado a um transformador elevador e a indutâncias e capacitâncias para o ajuste da ressonância, resultando em uma estrutura com capacidade de geração de pulsos elétricos na saída com amplitude de até 6kV para o nível de potência do projeto, os quais são aplicados em um conjunto em paralelo de 14 (quatorze) câmaras de descarga para geração de ozônio e injeção em água.

O trabalho apresenta uma revisão bibliográfica para as aplicações do ozônio, as principais topologias de conversores em baixa potência para geração de pulsos elétricos em ozonizadores, a análise de um produto comercial, a proposta e desenvolvimento de uma estrutura conversora em substituição ao produto comercial, resultando em melhor eficiência e maior fator de potência, apresentando-se suas análises qualitativas e quantitativas, modelação, metodologias de projeto, implementação de um protótipo funcional, os principais resultados finais e proposta de continuidade para futuras pesquisas.

**Palavras Chave:** Campos elétricos pulsados de alta tensão, Produção de ozônio, Higienização industrial com água ozonizada, Retificador Boost com elevado fator de potência, Inversor Full-bridge ressonante PWM.

---

## ABSTRACT

This research proposes, analyzes and implements a converter for generating high voltage electric pulses for application to ozone production and injection in water for the purpose of bactericidal and germicidal processes for cleaning and sanitizing industry applications.

The proposed converter consists of two stages, the first stage being a Boost rectifier operating in Discontinuous Conduction Mode (DCM), responsible for getting a Continuous Current (CC) bus regulated and, acting as input voltage follower presents a high power factor with reduced harmonic distortion to the input current; the second stage involves the use of a resonant Full-Bridge inverter controlled by phase-shift, using constant frequency (close to 10kHz) and bipolar modulation. The resonant inverter stage is composed of the bridge inverter associated with a step-up transformer, inductors and capacitors to adjust de resonant frequency, resulting in a structure capable of generating electric pulses with amplitude at the output of almost 6kV, which are applied on a set of fourteen (14) discharge chambers in parallel for ozone generation and injection in water.

The work presents a literature review for the applications of ozone, the main converter topologies at low power for generating electrical pulses in ozonizers, the analysis of a commercial product, a proposal and development of a power converter structure to replace the commercial one, resulting in better efficiency and high input power factor, presenting their qualitative and quantitative analysis, modeling, design methodologies, implementation of a functional prototype, the main experimental results and proposal of continuity of future researches.

**Keywords:** High voltage pulsed Electric fields, Ozone Production, Industrial Hygiene with ozonated water, Boost rectifier with high power factor, full-bridge PWM resonant inverter.

---

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação molecular do ozônio .....	19
Figura 2 – Distribuição de concentração do Ozônio na atmosfera.....	22
Figura 3 – Método Descarga Corona para a geração de ozônio.....	25
Figura 4 – Método Eletrolítico de geração de ozônio .....	28
Figura 5 – Diagrama monitor de ozônio por absorção de luz UV.....	30
Figura 6 – Estrutura proposta por Chao .....	45
Figura 7 – Estrutura analisada por Hothogkham e Kinnares.....	46
Figura 8 – Estrutura proposta por Amjad .....	46
Figura 9 – Sistema Ozonizador Comercial.....	48
Figura 10 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial .....	49
Figura 11 – Detalhe dos Pulsos gerados pelo conversor comercial .....	50
Figura 12 – Detalhamento dos Pulsos gerados pelo conversor comercial .....	50
Figura 13 – Estrutura proposta para a geração de ozônio.....	53
Figura 14 – Conversor Retificador Boost, estágio de entrada.....	55
Figura 15 – Tensão de saída do Boost e corrente no indutor Boost, no ponto de máxima tensão de entrada.....	59
Figura 16 – Tensão e corrente de entrada do retificador Boost.....	59
Figura 17 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada.....	60
Figura 18 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada vs. norma IEC 61000–3–2 classe D60	
Figura 19 – Tensão, corrente e corrente média na chave do conversor Boost. ....	62
Figura 20 – Tensão, corrente e corrente média no diodo Boost.....	63
Figura 21 – Tensão, corrente e corrente média em um diodo retificador de entrada. ....	64
Figura 22 – Corrente e corrente média no capacitor de saída. ....	65
Figura 23 – Tensão e corrente no indutor Boost. ....	66
Figura 24 – Tensão e corrente no indutor Boost, detalhe da operação.....	66
Figura 25 – Tensão e corrente no indutor Boost, detalhamento da operação.....	67
Figura 26 – Circuito equivalente de saída do conversor Boost.....	71
Figura 27 – Malha de tensão simulada para o retificador Boost. ....	73
Figura 28 – Controle da tensão no barramento CC +/- 50% de carga .....	74
Figura 29 – Controle da tensão no barramento CC -/+ 50% de carga .....	74
Figura 30 – Circuito equivalente do transformador de alta frequência .....	76

---

---

Figura 31 – Características magnéticas principais <i>iron powder</i> .....	78
Figura 32 – Núcleo NT 300/52D Enrolado. ....	80
Figura 33 – Parâmetros elétricos do transformador.....	81
Figura 34 – Foto da Câmara de descarga .....	82
Figura 35 – Diagrama interno Câmara de tratamento. ....	82
Figura 36 – Modelo elétrico da câmara de descarga .....	83
Figura 37 – Modelo para n câmaras em paralelo.....	84
Figura 38 – Determinação parâmetros elétricos da câmara de descarga.....	85
Figura 39 – Parâmetros Câmara de descarga experimento Kinnares .....	86
Figura 40 – Inversor Full–Bridge PWM Phase–shift ligado à carga.....	87
Figura 41 – Sequência de pulsos e tensão ( $V_{ab}$ ) na saída do inversor. ....	88
Figura 42 – Etapas de operação do inversor.....	89
Figura 43 – Circuito equivalente do estágio de saída.....	92
Figura 44 – Circuito equivalente simplificado. ....	92
Figura 45 – Circuito equivalente simplificado final.....	93
Figura 46 – Diagrama de bode para as funções de transferência analisadas do circuito equivalente de saída ressonante.....	95
Figura 47 – Tensão pulsada $V_{ab}$ de saída do inversor .....	96
Figura 48 – Circuitos equivalentes de segunda ordem.....	96
Figura 49 – Ponte inversora e Circuito equivalente. ....	100
Figura 50 – Tensão de saída e corrente ressonante, detalhe das correntes no braço ZVS. ....	101
Figura 51 – Formas de onda na ponte inversora.....	101
Figura 52 – Conversor proposto para geração de ozônio em aplicações de limpeza industrial. ....	104
Figura 53 – Placa desenvolvida para o conversor proposto. ....	105
Figura 54 – Tensão de entrada, tensão e corrente de saída do estágio Boost.....	106
Figura 55 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost.....	106
Figura 56 – Detalhe Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost.....	107
Figura 57 – Corrente no indutor boost em um quarto do período da rede. ....	107
Figura 58 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost, detalhamento próximo da região de tensão nula de entrada.....	108
Figura 59 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost, detalhamento em torno do valor de pico da tensão de alimentação. ....	108

---

---

Figura 60 – Tensão e corrente no Diodo Boost. ....	109
Figura 61 – Detalhe Tensão e corrente no Diodo Boost no MCD. ....	109
Figura 62 – Detalhe da Tensão e corrente no Diodo Boost, em torno da região do valor de pico da tensão de alimentação. ....	110
Figura 63 – Tensão e corrente de entrada do estágio Boost. ....	110
Figura 64 – Tensão nas câmaras de descarga e corrente ressonante no primário do transformador elevador. ....	111
Figura 65 – Tensão nas câmaras de descarga e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor. ....	112
Figura 66 – Tensão e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor. ....	112
Figura 67 – Detalhe Tensão e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor. .	113
Figura 68 – Tensão no capacitor série $C_R$ e corrente ressonante no primário do transformador elevador. ....	113
Figura 69 – Tensão $V_{ab}$ de saída do estágio inversor e corrente ressonante. ....	114
Figura 70 – Tensão $V_{ab}$ de saída do estágio inversor e corrente ressonante. ....	114
Figura 71 – Tensão e corrente em uma das chaves (S2) do braço ZVS do estágio inversor..	115
Figura 72 – Tensão e corrente em S2 do braço ZVS do estágio inversor. ....	115
Figura 73 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial (em 5ms). ....	116
Figura 74 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido (em 5ms). ....	116
Figura 75 – Detalhamento dos pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido. ....	117
Figura 76 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial (10ms). ....	118
Figura 77 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido (10ms). ....	118
Figura 78 – Local dos testes de produção de ozônio injetado em água. ....	119
Figura 79 – Kit para a medição de ozônio residual dissolvido em água (teste de colorimetria). ....	120
Figura 80 – Máxima concentração de ozônio obtida com o conversor comercial. ....	120
Figura 81 – Local dos testes com o conversor desenvolvido. ....	121
Figura 82 – Máxima concentração de ozônio obtida com o conversor desenvolvido. ....	122
Figura 83 – Concentração de Ozônio (mg/l) na água produzida para os testes comparativos. ....	122
Figura 84 – Comparação pulsos de tensão gerados: (a)produto comercial e (b)conversor proposto. ....	123

---



---

Figura 85 – Comparação concentração de ozônio residual: (a)produto comercial e (b)conversor proposto.....	124
Figura 86 – Padrão concentração ozônio da Ozone Solutions. ....	134
Figura 87 – Transformador elevador, de alta tensão e de alta frequência desenvolvido.....	136

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas do ozônio .....	20
Tabela 2 – Resumo modos de geração de ozônio.....	29
Tabela 3 – Resumo métodos de Medição .....	33
Tabela 4 – Ensaio Elétrico Ozonizador Comercial .....	49
Tabela 5 – Comparação: Ozonizador Comercial e Proposta.....	54
Tabela 6 – Parâmetros de operação do conversor retificador Boost .....	58
Tabela 7 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada vs. norma IEC 61000-3-2 classe D.	61
Tabela 8 – Esforços na chave do conversor Boost .....	61
Tabela 9 – Esforços obtidos em simulação: Diodo do conversor Boost .....	62
Tabela 10 – Esforços Diodos Retificadores .....	63
Tabela 11 – Capacitor filtro saída Boost .....	64
Tabela 12 – Esforços Indutor Boost .....	65
Tabela 13 – Projeto indutor Boost.....	69
Tabela 14 – Projeto indutor Filtro de entrada.....	70
Tabela 15 – Características básicas do transformador elevador.....	79
Tabela 16 – Projeto Transformador elevador .....	79
Tabela 17 – Possíveis Transistores para o estágio Boost. ....	137
Tabela 18 – Possíveis Diodos Boost para a aplicação.....	138
Tabela 19 – Possíveis Capacitores para a aplicação.....	138

---

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$A$	Unidade de medida Ampère
$\text{Å}$	Unidade de medida Ångström.
$A_c$	Área do braço do núcleo
$A_{\text{Bitola}}$	Bitola do condutor do indutor boost
$AgBr$	Brometo de Prata
$A_j$	Área livre da janela no núcleo do indutor ou transformador
$A_l$	Fator de classificação de indutância para cada tipo de núcleo
$Am$	Amerício
$A_{oc}$	Área da janela ocupada pelo enrolamento
$A_p$	Área transversal da perna central do núcleo
$A_{vm}$	Tensão de entrada ao inversor
$awg$	Escala americana normalizada (American wire gauge)
$\alpha$	Ganho estático do conversor boost
$\alpha_{mol}$	Coefficiente de absorção molar do ozônio
$B$	Densidade de Fluxo Magnético
$C$	Capacitância
$C(s)$	Função de transferência do compensador
$C_{oz}$	Concentração de ozônio
$CA$	Corrente Alternada
$CC$	Corrente Contínua
$C_c$	Capacitância de n câmaras em paralelo refletida ao primário do tf
$C_{cam}$	Capacitância equivalente da câmara de descarga
$C_{camn}$	Capacitância equivalente de n câmaras de descarga em paralelo
$C'_{camn}$	Capacitância de n câmaras em paralelo refletida ao primário do tf
$C_d$	Capacitância equivalente do dielétrico da câmara de descarga
$C_{dc}$	Capacitor filtro de saída do retificador Boost
$CEP$	Campos elétricos pulsados
$C_f$	Capacitância filtro de entrada
$CFP$	Corretor do fator de potência
$C_g$	Capacitância equivalente do espaço interior da câmara
$C_i$	Capacitância interna Drain Source dos transistores do inversor

---

---

$CM$	Circular Mills
$CO$	Nomenclatura Monóxido de carbono
$COV$	Compostos orgânicos voláteis
$C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$	Nomenclatura Corante Índigo carmim
$C2v$	Simetria 1 eixo e 2 planos que contêm o eixo
$D$	Razão cíclica da condução do boost
$dB$	Unidade de medida Decibel
$dec$	Década
$D_i$	Nomenclatura Diodos $i$ em antiparalelo nos transistores do inversor
$D_{max}$	Razão cíclica máxima da condução do boost
$DHT$	Distorção Harmônica Total
$DPD$	N,N-Dietil-p-fenilendiamina
$DSC$	Controlador Digital (Digital Signal Controller)
$DU$	Unidade Dobson
$F$	Unidade de medida Farad
$f_c$	Frequência de corte
$f_m$	Frequência de amostragem do compensador digital
$f_r$	Frequência da rede
$f_{rede}$	Frequência da rede
$FP$	Fator de Potência
$f_p$	Frequência de polo do conversor boost
$FP_{in}$	Fator de Potência de entrada
$f_s$	Frequência de chaveamento
$f_{sp}$	Frequência dos pulsos bipolares de saída do inversor
$f_{zc}$	Frequência de zero do compensador
$g$	Unidade de medida Grama
$G(s)$	Função de transferência entre $V_{out}$ e $D$
$H$	Unidade de medida Henry
$h$	Unidade de medida Hora
$HVDC$	Corrente contínua de alta tensão
$Hz$	Unidade de medida Hertz
$H_2$	Nomenclatura Molécula de Hidrogênio
$H_2O$	Nomenclatura Molécula de Água
$IEC$	Comissão eletrotécnica internacional
$i_{in}$	Corrente de entrada

---

---

$I_{in\ rms}$	Corrente eficaz de entrada (rede)
$I_l$	Corrente eficaz pelo indutor boost
$I_{lr}$	Corrente ressonante pelo indutor e capacitor serie
$I_m$	Atenuação do feixe de luz na célula de absorção
$I_{md}$	Corrente média no indutor boost em um período de chaveamento
$I_r$	Intensidade da luz de referência
$I_{out}$	Corrente de saída do retificador boost
$I_{out\ max}$	Corrente máxima de saída do retificador boost
$I_o$	Corrente média no indutor boost em um período da rede
$I_p$	Corrente pico no indutor boost
$I_{p\ tf}$	Corrente pico no primário do transformador elevador
$I_2$	Nomenclatura Molécula de Iodo (Diiodo)
$J$	Unidade de medida Joule
$J_l$	Densidade de Corrente
$K$	Unidade de medida Graus Kelvin
$KBr$	Nomenclatura Brometo de Potássio
$KI$	Nomenclatura Iodeto de Potássio
$KOH$	Nomenclatura Hidróxido de Potássio
$K_p$	Fator de utilização no indutor boost
$K_p$	Constante proporcional do compensador para o conversor boost
$K_i$	Constante integral do compensador para o conversor boost
$K_w$	Fator de ocupação do enrolamento na janela do núcleo
$K_2SO_4$	Nomenclatura Sulfato de Potássio
$L$	Indutância
$l$	Unidade de medida Litro
$L_{cela}$	Comprimento da célula de absorção
$L_{comp}$	Comprimento do condutor do indutor
$LCL$	Circuito ressonante indutância – capacitância – indutância
$LEP$	Laboratório de Eletrônica de Potência
$L_f$	Indutância filtro de entrada
$L_g$	Comprimento entreferro
$L_{in}$	Indutância indutor boost
$L_m$	Indutância de magnetização do transformador elevador
$L_p$	Indutância do primário do transformador elevador

---

---

$L_s$	Indutância serie ressonante
$L_s$	Indutância de dispersão do secundário do transformador
$L'_s$	Indutância do secundário do transformador refletida ao primário
$L_{serie}$	Indutor serie ressonante
$L_t$	Indutância total equivalente do circuito ressonante
$M$	Agente que transporta o excesso de energia na reação
$m$	Unidade de medida Metro
$MCC$	Modo de Condução Contínua
$MCD$	Modo de Condução Descontínua
$N$	Relação de elevação do transformador de alta frequência
$NASA$	Administração nacional de aeronáutica e do espaço
$Na_2S_2O_2$	Nomenclatura Tiosulfato de Sódio
$N_c$	Número de câmaras de descarga ligadas em paralelo
$NEE$	Formato do núcleo de ferrite empregado
$N_{esp}$	Número de espiras indutor boost
$NO_x$	Nomenclatura Óxidos de nitrogênio
$NO_2$	Nomenclatura Dióxido de nitrogênio
$N_p$	Número de espiras do primário do transformador
$N_2$	Nomenclatura Molécula de Nitrogênio
$OES$	Padrões de exposição ocupacional
$O_2$	Nomenclatura molécula de oxigênio
$O_3$	Nomenclatura molécula de ozônio
$Pb$	Chumbo
$PCI$	Placa de Circuito Impresso
$PI$	Compensador Proporcional–Integral
$P_{in}$	Potência ativa de entrada
$P_{inc}$	Potência transferida pelo conversor boost
$PLL$	Phase–Locked Loop
$PLR$	Topologias ressonantes de carga paralela
$P_{out}$	Potência de saída do retificador boost
$P_{out\ max}$	Potência máxima de saída do retificador boost
$ppb$	Partes por bilhão
$ppm$	Partes por milhão
$PSIM$	Simulador de circuitos eléctricos
$Pu$	Plutônio

---

---

$P_u$	Perímetro médio do braço central do núcleo
$PWM$	Pulse Width Modulation
$Q_i$	Nomenclatura dos transistores $i$ do inversor
$Q_{in}$	Potência aparente de entrada
$Q_p$	Fator de qualidade carregado
$R$	Resistencia
$R_c$	Resistencia de $n$ câmaras em paralelo refletida ao primário do tf
$R_{cam}$	Resistencia equivalente da câmara de descarga
$R_{camn}$	Resistencia equivalente de $n$ câmaras de descarga ligadas em paralelo
$R'_{camn}$	Resistencia de $n$ câmaras em paralelo refletida ao primário do tf
$R_{eq\ in}$	Resistencia equivalente
$RMS$	Valor quadrático médio ou valor eficaz (Root Mean Square)
$R_{out}$	Carga resistiva equivalente do conversor boost
$R_p$	Resistencia do enrolamento primário do transformador
$R_s$	Resistencia do enrolamento secundário do transformador
$R'_s$	Resistencia do secundário do transformador refletida ao primário
$R_t$	Resistencia equivalente total do circuito ressonante equivalente
$s$	Unidade de medida segundo
$S_i$	Nomenclatura dos transistores $i$ do inversor
$S_{in}$	Potência aparente de entrada
$S_2O_3^{2-}$	Nomenclatura Ânion Tiosulfato
$S_4O_6^{2-}$	Nomenclatura Íon Tetrionato
$T$	Unidade de medida Tesla
$T_{ao}$	Constante de tempo do compensador
$t_c$	Tempo de descarga do indutor boost
$tf$	Transformador
$t_f$	Tempo de condução ou carregamento do indutor boost
$T_m$	Período de amostragem do compensador digital
$t_{pulso}$	Largura dos pulsos a elevar
$T_s$	Período de chaveamento
$UNESP$	Universidade Estadual Paulista
$UV$	Ultra Violeta
$V$	Unidade de medida Volts
$VA$	Unidade de medida Volt – Ampère

---

---

$V_{AB}$	Tensão Bipolar de saída do inversor
$V_c$	Tensão de controle
$V_{CC}$	Tensão CC de entrada ao inversor, equivalente a $V_{out}$
$V_{dc}$	Tensão retificada de entrada ao inversor
$v_{des}$	Tensão mantida durante a descarga nos eletrodos da câmara
$v_{in}$	Tensão de entrada
$V_{in\ pico}$	Tensão pico de entrada da rede
$V_{in\ rms}$	Tensão eficaz de entrada
$v_{inv}$	Tensão bipolar de saída do inversor
$V_l$	Tensão no indutor boost
$V_{min}$	Tensão de entrada no primário do transformador
$V_o$	Tensão nas câmaras de descarga refletida ao primário
$V_{out}$	Tensão CC de saída do retificador Boost
$V_{pp}$	Volts pico–pico
$V_{ref}$	Tensão de referência
$V_{rms}$	Tensão eficaz
$W$	Unidade de medida Watts
$\omega$	Frequência angular da tensão da rede
$\omega_c$	Frequência angular de corte
$\omega_p$	Frequência natural não amortecida
$\omega_r$	Frequência de ressonância do circuito
$ZCD$	Detector de corrente zero (Zero Current Detection)
$ZCS$	Comutação com corrente zero (Zero Current Switching)
$Z_t$	Impedância equivalente total do circuito ressonante equivalente
$ZVD$	Detector de tensão zero (Zero Voltage Detection)
$ZVS$	Comutação com tensão zero (Zero Voltage Switching)
$\lambda$	Comprimento de onda
$^{\circ}C$	Graus Centígrados
$^{\circ}$	Graus
$\mu_0$	Permeabilidade do ar
$\varphi$	Defasagem entre os sinais das chaves no inversor, variável de controle
$\theta$	Defasagem entre a corrente e tensão de saída do inversor

---



---

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>19</b>
1.1.	<b>OSÔNIO NA ATMOSFERA .....</b>	<b>21</b>
1.1.1.	<i>OSÔNIO ESTRATOSFÉRICO.....</i>	<i>21</i>
1.1.2.	<i>OSÔNIO TROPOSFÉRICO .....</i>	<i>23</i>
1.2.	<b>MODOS DE GERAÇÃO DO OSÔNIO.....</b>	<b>23</b>
1.2.1.	<i>MÉTODO DE DESCARGA CORONA.....</i>	<i>24</i>
1.2.2.	<i>LUZ ULTRAVIOLETA .....</i>	<i>26</i>
1.2.3.	<i>ELETROLÍTICO .....</i>	<i>28</i>
1.2.4.	<i>PLASMA FRIO.....</i>	<i>28</i>
1.2.5.	<i>RESUMO MÉTODOS DE GERAÇÃO .....</i>	<i>29</i>
1.3.	<b>MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO OSÔNIO RESIDUAL.....</b>	<b>29</b>
1.3.1.	<i>ABSORÇÃO DE LUZ UV .....</i>	<i>30</i>
1.3.2.	<i>MÉTODO IODOMÉTRICO .....</i>	<i>31</i>
1.3.3.	<i>MÉTODO AMPEROMÉTRICO.....</i>	<i>31</i>
1.3.4.	<i>COLORIMETRIA .....</i>	<i>32</i>
1.3.5.	<i>MÉTODO DE MEDIÇÃO ESCOLHIDO PARA A APLICAÇÃO.....</i>	<i>32</i>
1.3.6.	<i>RESUMO MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....</i>	<i>33</i>
1.4.	<b>APLICAÇÕES GERAIS DO OSÔNIO .....</b>	<b>34</b>
1.4.1.	<i>APLICAÇÕES EM PROCESSOS DE LIMPEZA E LAVAÇÃO INDUSTRIAL..</i>	<i>35</i>
1.5.	<b>MOTIVAÇÃO E PROPOSTA DA TESE.....</b>	<b>36</b>
1.6.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>CONVERSORES ELETRÔNICOS PARA OBTENÇÃO DE OSÔNIO .....</b>	<b>40</b>
2.1.	<b>FONTE GERADORA DOS PULSOS DE TENSÃO .....</b>	<b>44</b>
2.2.	<b>ENSAIOS COM OZONIZADOR COMERCIAL.....</b>	<b>47</b>
2.2.1.	<i>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO OZONIZADOR.....</i>	<i>48</i>
2.2.2.	<i>UNIDADE GERADORA DE PULSOS .....</i>	<i>48</i>
2.3.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DE CONVERSOR PARA PRODUÇÃO DE OSÔNIO.....</b>	<b>53</b>
3.1.	<b>ESTÁGIO DE ENTRADA COM CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA....</b>	<b>55</b>
3.1.1.	<i>SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA .....</i>	<i>59</i>
3.1.2.	<i>PROJETO FÍSICO DE COMPONENTES .....</i>	<i>61</i>
3.1.3.	<i>CONTROLE CONVERSOR BOOST – MALHA DE TENSÃO.....</i>	<i>71</i>
3.2.	<b>ESTÁGIO DE SAÍDA .....</b>	<b>75</b>
3.2.1.	<i>TRANSFORMADOR ELEVADOR .....</i>	<i>75</i>
3.2.2.	<i>CÂMARAS DE DESCARGA .....</i>	<i>81</i>
3.3.	<b>MODELAMENTO DO SISTEMA .....</b>	<b>87</b>
3.3.1.	<i>CIRCUITO EQUIVALENTE DO ESTÁGIO DE SAÍDA .....</i>	<i>91</i>
3.4.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS....</b>	<b>104</b>
4.1.	<b>ESTÁGIO DE ENTRADA BOOST .....</b>	<b>105</b>
4.2.	<b>ESTÁGIO DE SAÍDA .....</b>	<b>111</b>
4.3.	<b>COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DE SAÍDA, APLICADAS ÀS CÂMARAS DE DESCARGA .....</b>	<b>116</b>
4.4.	<b>MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE PRODUÇÃO DE OSÔNIO .....</b>	<b>119</b>
4.5.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>122</b>

---

---

<b>5 CONCLUSÕES GERAIS E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>137</b>

---

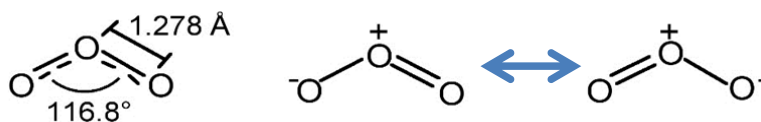
# 1 INTRODUÇÃO GERAL

O ozônio ( $O_3$ ) é uma molécula industrialmente conhecida como um ótimo desinfetante, desodorizante e oxidante, o que faz com que tenha muitas aplicações científicas, médicas e industriais, sendo a purificação ou tratamento de água (às vezes para o consumo humano) e a limpeza as maiores aplicações atuais. O ozônio é gerado naturalmente na atmosfera, mas nas últimas décadas a sua produção artificial cresceu e aperfeiçoou-se até se tornar economicamente viável para as mais variadas aplicações industriais. Dada a instabilidade própria da molécula de ozônio gasoso, o ozônio não pode ser armazenado nem transportado na forma gasosa, uma vez que rapidamente se decompõe em oxigênio diatômico, o que gera a necessidade de produção no local de seu emprego (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 1996).

Existem diversas formas de gerar ozônio artificialmente, entre as principais se encontram o método de descarga corona, método eletrolítico, descarga de plasma frio e exposição a luz ultravioleta. Sendo algumas destas formas de geração mais eficientes do que outras, em termos energéticos. Conversores elétricos geradores de pulsos de alta tensão são utilizados e podem ser otimizados com diversas ferramentas da engenharia elétrica para a aplicação do método de descarga corona, conversores cada vez mais eficientes na concentração de ozônio obtida, em relação à potência elétrica empregada, fazem com que a utilização do ozônio seja uma opção economicamente viável, principalmente para processos de higienização industrial.

Em relação à estrutura química e de acordo com dados experimentais a partir de espectroscopia de micro-ondas, o ozônio é uma molécula dobrada, com simetria de 1 eixo e 2 planos (simetria  $C_{2v}$  semelhante à molécula de água), conforme Figura 1. A ligação pode ser expressa como um híbrido de ressonância com uma ligação simples de um lado e de dupla ligação na outra, produzindo uma ordem de ligação global de 1,5 para cada lado (BARRON, 2010).

Figura 1 – Representação molecular do ozônio



Fonte: Barron (2010).

Quimicamente falando o ozônio é uma molécula constituída por três átomos de oxigênio, formada ao se dissociar dois átomos que constituem o gás de oxigênio (O<sub>2</sub>), onde um átomo de oxigênio liberado une-se a outra molécula próxima de gás oxigênio (O<sub>2</sub>) formando uma molécula de ozônio (O<sub>3</sub>) (MOHAMED, 1990).

O ozônio é um gás solúvel em água que se apresenta naturalmente em estado gasoso tendo uma cor azul pálida, se condensa perto de -112°C para formar um líquido azul escuro e se solidifica perto dos -194°C para formar um sólido negro-violeta (Mordecai B. Rubin, Technion- Israel Institute of Technology, 2004). Na sequência mostra-se um resumo das principais propriedades físicas do ozônio (AIR LIQUIDE, 2013).

Tabela 1 – Propriedades físicas do ozônio

<b>Propriedades físicas do ozônio</b>		
<b>Peso Molecular</b>	Peso Molecular	47,98 g / mol
<b>Fase Líquida</b>	Densidade do líquido (1.013 bar no ponto de ebulição)	1352 kg/m <sup>3</sup>
	Ponto de ebulição (1.013 bar)	-111,3 ° C
	Calor latente de vaporização (1.013 bar no ponto de ebulição)	316,3 kJ / kg
<b>Ponto Crítico</b>	Temperatura crítica	-12,2 ° C
	Pressão crítica	55,73 bar
	Densidade crítica	540 kg/m <sup>3</sup>
<b>Ponto Triplo</b>	Temperatura do ponto triplo	-192,5 ° C
	Pressão ponto triplo	0.0000114 bar
<b>Fase Gasosa</b>	Densidade do gás (1.013 bar e 0 ° C)	2.14 kg/m <sup>3</sup>
	Densidade (ar = 1) (1.013 bar e 21 ° C)	1,61
	Volume específico (1,013 bar e 21 ° C)	0,52 m <sup>3</sup> /kg
	Capacidade de calor a uma pressão constante (1 bar e 25 ° C)	0,04 kJ / (mol.K)

Fonte: Air Liquide (2013).

A maioria das pessoas podem detectar cerca de 0,1 mmol / mol de ozônio no ar, uma vez que o mesmo apresenta um forte odor picante específico que se assemelha ao cloro. A exposição de 0,1 a 1 mol / mol produz dores de cabeça, irritação nos olhos e nas vias respiratórias. Mesmo baixas concentrações de ozônio no ar são muito destrutivas para os materiais orgânicos, tais como o látex, plásticos e o tecido pulmonar dos animais. Exposições ao ozônio em concentrações de até 0,08 ppm (partes por milhão) por mais de 6 horas levam a um significativo decremento do funcionamento pulmonar humano (DUMLER et al., 1994).

Exposição ao ozônio também causa efeitos extrapulmonares envolvendo o sangue, o baço, sistema nervoso central e outros órgãos. Uma combinação de O<sub>3</sub> e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) pode produzir efeitos que podem ser aditivos ou sinérgicos em uma lesão pulmonar maior. Antioxidantes na dieta, por exemplo, vitamina E, vitamina C e selênio podem oferecer uma proteção contra os efeitos prejudiciais do O<sub>3</sub> (MOHAMED, 1990).

## **1.1. Ozônio na atmosfera**

O ozônio está presente de forma natural na estratosfera (ozônio estratosférico) formando a denominada camada de ozônio, também está presente em concentrações menores perto da superfície terrestre (ozônio troposférico).

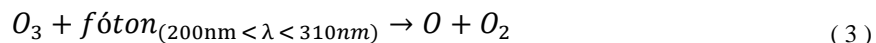
### ***1.1.1. Ozônio estratosférico***

O ozônio estratosférico é formado pela ação da radiação ultravioleta tipo C ( $\lambda < 240nm$ ), que dissocia as moléculas de oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) em dois átomos que são altamente reativos e podem reagir com outra molécula de O<sub>2</sub> para formar ozônio em um ciclo conhecido como o ciclo Chapman (JACOB, 1999).

O ozônio é destruído por sua vez, por ação de radiação ultravioleta (UV) em comprimentos de onda semelhantes e as vezes maior à frequência de geração (entre 200nm e 310nm) faixa composta por radiação ultravioleta tipo B e tipo C, a que faz que se desprenda um átomo de oxigênio da molécula de ozônio. Isto forma um equilíbrio dinâmico no qual o ozônio é formado e destruído, perdendo e consumindo assim a maior parte da radiação de comprimento de onda inferior a 290nm (JACOB, 1999). Deste modo, o ozônio atua como um filtro que não deixa passar esta radiação prejudicial (radiação UV tipo B e C) para a superfície da terra (NASA, 2002).

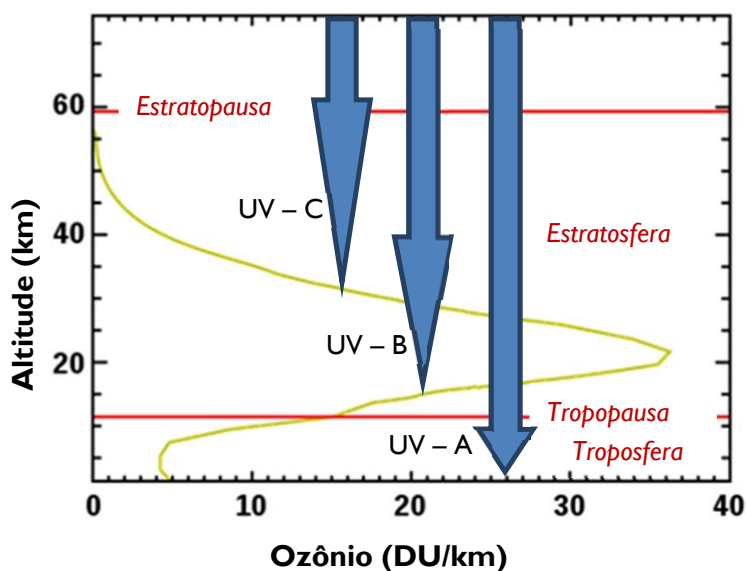
O ozônio atmosférico encontra-se em estado puro em diferentes concentrações entre os 10 e 40 km sobre o nível do mar (zona conhecida como a camada de ozônio), tendo a concentração mais alta perto dos 25 km. Nessa faixa as concentrações de ozônio estão na faixa de 2–8 partes por milhão, a maior parte do oxigênio que resta na atmosfera é do tipo gás O<sub>2</sub> (JACOB, 1999).

Na sequência mostra-se o ciclo Chapman de geração e destruição do ozônio na atmosfera, ciclo descrito de forma básica anteriormente. Onde "M" indica o agente que transporta o excesso de energia da reação (EAST STROUDSBURG UNIVERSITY, 2013).



A Figura 2 mostra a distribuição da concentração do ozônio na atmosfera, onde a linha curva verde indica o máximo de concentração perto dos 25 km de altitude, com valores máximos entre 35DU/km e 40DU/km. A unidade Dobson (DU) é uma unidade de medida da densidade colunar de um gás na atmosfera da Terra. Originou-se, e continua sendo amplamente utilizado, como medida de ozônio total colunar. Um DU é  $2,69 \times 10^{16}$  moléculas de ozônio por centímetro quadrado (JACOB, 1999).

Figura 2 – Distribuição de concentração do Ozônio na atmosfera



Fonte: Adaptado de NASA (2002).

As faixas verticais indicam o consumo da luz ultravioleta nos processos de geração e destruição do ozônio nos seus três principais comprimentos de onda classificados para as reações atmosféricas, mostra-se que a luz UV curta (tipo C com comprimento de onda de 280 até 100 nm) é filtrada inicialmente na parte alta da atmosfera com a geração do ozônio e absorvida quase em sua totalidade neste processo. No processo de destruição do ozônio participa a luz UV Média (tipo B com comprimento de onda de 320 até 280 nm) a qual é parcialmente absorvida neste processo segundo mostra a barra central, o excesso desta luz não

filtrada é a responsável pelos danos à pele. Assim, a maioria dos raios UV que chegam até a superfície da terra são do tipo A (com comprimento de onda de 400 até 320 nm), radiação atmosférica pouco prejudicial e minimamente utilizada nos processos de geração e destruição do ozônio (NASA, 2002).

### ***1.1.2. Ozônio troposférico***

O ozônio troposférico ou ozônio ambiental é criado por reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COV) provenientes de fontes como a queima de combustível. O mecanismo pelo qual é gerado o ozônio na troposfera é completamente diferente do método de formação do ozônio estratosférico, pois neste ponto não há radiação ultravioleta suficiente (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

Podem ser encontrados na zona mais baixa da atmosfera, uma vez que se trata de emissões naturais de COV, NOx e CO, e o Ozônio estratosférico descendente. Isto torna-se um problema, pois o Ozônio, em concentrações suficientes e por longos períodos é perigoso, podendo causar danos para a saúde humana (a partir de cerca de 150 microgramas por metro cúbico) ou vegetação (a partir de 30 ppb (partes por bilhão)). Além disso, pode também contribuir para o aquecimento da superfície da terra (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

## **1.2. Modos de geração do ozônio**

O principal modo de geração de ozônio é o modo natural anteriormente apresentado, que se desenvolve na atmosfera a partir da incidência de raios ultravioleta no gás de oxigênio O<sub>2</sub>, dando início às reações fotoquímicas.

Outra maneira comum de geração de ozônio na atmosfera é quando o oxigênio atmosférico é submetido a pulsos eletromagnéticos de alta energia como um relâmpago, onde o vínculo duplo O=O é quebrado, entregando dois átomos de oxigênio que então se recombinam com outras moléculas de oxigênio, gerando O<sub>3</sub> (ALONSO et al., 2009).

Assim, duas formas importantes de geração de ozônio são; primeiro a partir da incidência de raios ultravioleta dando início a reações fotoquímicas, e segundo, a partir de pulsos elétricos de alta tensão no gás de oxigênio O<sub>2</sub>. Industrialmente, estas duas formas mencionadas são recriadas artificialmente e são as mais utilizadas, mas também existem

outras formas pouco comerciais como o método eletrolítico e a descarga de plasma frio, que partem do objetivo básico de obter átomos de oxigênio para uma posterior recombinação (WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD, 2012).

Certos equipamentos elétricos geram acidentalmente níveis significativos de ozônio, especialmente dispositivos que utilizam altas tensões na sua operação, como impressoras a laser, copiadoras (HEALTH AND SAFETY DEPARTMENT, THE UNIVERSITY OF EDINBURGH, 2010), tasers, soldadores de arco, motores elétricos com escovas, onde se pode gerar ozônio a partir de repetidas faíscas nos comutadores (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 1996). Purificadores eletrostáticos de ar também podem produzir ozônio de forma não desejada quando seus eletrodos estão sujos, fato que leva a grandes implicações na segurança da operação do purificador (DORSEY; DAVIDSON, 1992).

Por causa da alta reatividade do ozônio, poucos materiais podem ser utilizados na produção, como o aço inoxidável, titânio, alumínio (contanto que não haja umidade presente), vidro, politetrafluoretileno, ou fluoreto de polivinilideno (PRIMOZONE, 2012).

Os riscos para a saúde na exposição ao ozônio são leves, e em geral todos os sintomas apresentados serão irritação do trato respiratório. No entanto, é possível que em certos casos apareçam níveis de ozônio acima dos Padrões de Exposição Ocupacional (OES) em salas sem ventilação adequada (HEALTH AND SAFETY DEPARTMENT, THE UNIVERSITY OF EDINBURGH, 2010).

O OES indica a concentração de uma substância no ar medida ao longo de um período de tempo referência, período para o qual não há nenhuma evidência de que a substância seja prejudicial para empregados ou trabalhadores se eles são expostos por inalação, dia após dia, a essa concentração. Os OESs são aprovados pela Comissão de Saúde e Segurança e são aplicáveis apenas para pessoas no trabalho. O OES atual para o ozônio é de 0,2 ppm no ar em média em um período de referência de 15 minutos (HEALTH AND SAFETY DEPARTMENT, THE UNIVERSITY OF EDINBURGH, 2010).

### ***1.2.1. Método de descarga Corona***

O método mais comum e objeto de estudo da presente pesquisa é conhecido como Descarga Corona, basicamente chamado assim pelo mesmo efeito presente nas linhas de transmissão de alta tensão. Nos sistemas de transmissão em corrente contínua, as perdas por efeito Corona são proporcionais à quantidade de ozônio gerado em torno do condutor

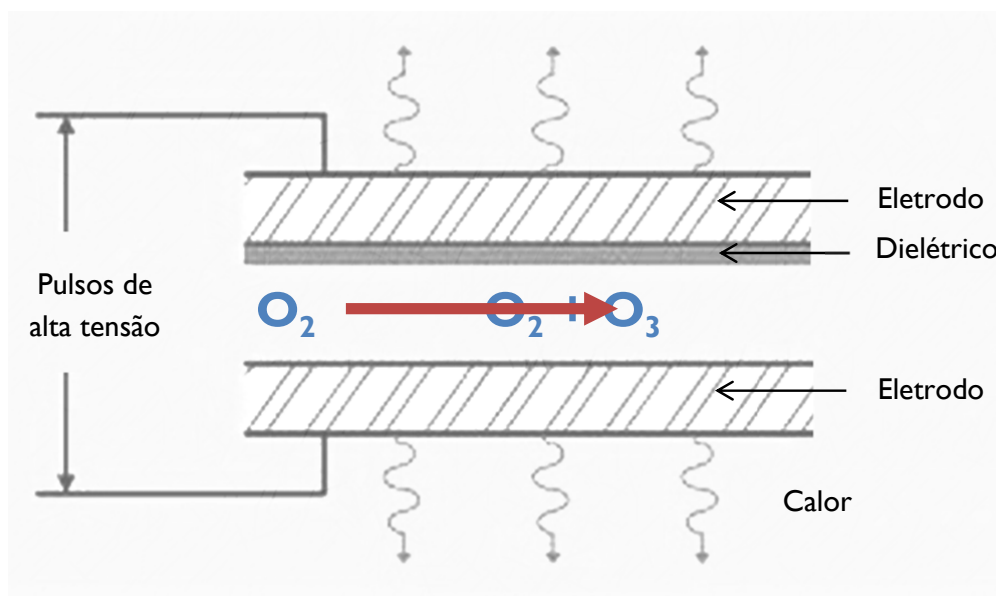


energizado. O ambiente perto de uma linha de transmissão de alta tensão de corrente contínua (HVDC) experimenta efeitos corona, incluindo a produção de oxidantes (DROPPA, 1981).



Na produção artificial, o método consiste basicamente na passagem do ar através de tubos de vidro com superfícies metalizadas dispostos de forma concêntrica entre os quais se faz pulsar uma alta diferença de potencial, geralmente maior a 3kV, em frequências médias e altas (variando desde 50 Hz até 25kHz) para proporcionar a quebra das ligações entre os átomos do gás de oxigênio causando a formação de Ozônio (WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD, 2012). O processo é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Método Descarga Corona para a geração de ozônio



Fonte: (BIOWELL INFECTION CONTROL, 2013).

Quanto maior a tensão dos pulsos maior será a quantidade de ozônio produzida quando se mantém a frequência constante (HONN et al., 1976). E quanto maior a frequência dos pulsos, maior será a quantidade de ozônio produzida quando se mantém a tensão dos pulsos constante (KETKAEW, 2007).

Assim, pode-se concluir que, para o caso que seja mantida constante a potência de geração, a tensão e a frequência empregadas são inversamente proporcionais na produção de níveis semelhantes de ozônio, ou seja, casos envolvendo maior tensão a baixa frequência trazem resultados semelhantes a testes ou casos com maior frequência e menor tensão.

Esta técnica tem sido investigada por um longo período de tempo e é amplamente utilizada na indústria, mas ainda tem muito progresso a ser feito para aumentar a eficiência

---

global de reatores existentes, desde o tratamento elétrico até a geometria, questões físicas e químicas nas câmaras de descarga. Em relação à primeira parte, uma possibilidade de aumentar a eficiência, segundo a proposta deste trabalho, é a utilização de conversores de média e alta frequência a partir da eletrônica de potência, pois estes geram menores perdas de energia na produção de ozônio, apresentam menor tamanho e peso, e fornecem a possibilidade de controlar a quantidade de ozônio gerado (ALONSO et al., 2004).

Ozonizadores comerciais em geral e outros ozonizadores como o empregado por (KETKAEW, 2007), trabalham com um fator de Potência em torno de 0,6. Desta forma, um dos objetivos deste trabalho é construir uma solução com um processamento prévio da energia elétrica, melhorando o fator de potência, o que possibilitaria a obtenção de um protótipo mais eficiente quando comparado com as opções comerciais convencionais.

Portanto, este processo é o tipo mais comum de geração de ozônio para muitas aplicações de usos industriais e residenciais, são tipicamente rentáveis e não requerem uma fonte auxiliar de oxigênio, só o ar do ambiente. Flutuações principalmente na umidade e temperatura do ar ambiente, devido ao mau tempo ou outras condições ambientais, causam variabilidade na produção de ozônio. O uso de um secador de ar pode reduzir ou eliminar a formação de ácido nítrico (que é produzido como subproduto), através da remoção de vapor de água e aumentar a produção de ozônio. A utilização de um concentrador de oxigênio pode aumentar ainda mais a produção de ozônio e reduzir ainda mais o risco de formação de ácido nítrico, através da remoção não apenas do vapor de água, mas também a maior parte do nitrogênio (WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD, 2012).

Uma desvantagem da geração de ozônio com o método de descarga Corona é a necessidade de limpeza periódica dos sistemas e câmaras de descarga, a menos que seja usado oxigênio puro ou um ótimo secador de ar. Produção de gases não desejados e contaminantes como óxidos de nitrogênio são os principais problemas, quando não utilizado oxigênio puro como gás a processar (WATER INVENTION, 2013).

### ***1.2.2. Luz Ultravioleta***

No método de geração de ozônio com luz ultravioleta emprega-se uma fonte de luz ultravioleta de banda estreita centrada na faixa de frequências dos raios UV Tipo C (faixa empregada para sustentar a camada de ozônio na estratosfera da terra; partindo do mesmo princípio apresentado na seção 1.1.1 Ozônio estratosférico).

---

---

Uma desvantagem deste método é que ele exige que o ar (oxigênio) seja exposto à fonte de UV durante um maior período de tempo em relação ao método anterior, isto faz com que os geradores UV sejam pouco práticos para uso em situações de fluxos rápidos de ar ou água, por exemplo: esterilização do ar em um canal. Produção de ozônio por este método apresenta um perigo potencial de exposição à radiação ultravioleta para a saúde humana. Geradores UV são utilizados em aplicações inclusive para piscinas de até milhares de litros de água (WATER INVENTION, 2013).

Comparando os dois métodos principais anteriormente descritos, apresentam-se a seguir as principais vantagens e desvantagens da geração de ozônio com o método de descarga Corona em relação ao método com luz UV (WATER INVENTION, 2013):

A célula Corona excede a expectativa de vida de qualquer lâmpada UV quando ar seco ou oxigênio é utilizado. Volume reduzido dos equipamentos permitindo que o gerador seja instalado em praticamente qualquer área ou recinto. Maior concentração de ozônio gerada possível entre qualquer outro tipo de geração comercial de ozônio, conforme dados resumidos na Tabela 2. Sistemas Industriais podem usar preparações de oxigênio, dobrando a produção de ozônio por volume em contrapartida à utilização de só ar seco. O método de descarga corona é mais rentável do que a geração com luz UV para instalações de grande escala e necessidades de alta concentração. Muito menos energia elétrica é necessária para produzir a mesma quantidade de ozônio em comparação com o método UV. Não tem risco de câncer ou problemas por exposição acidental das pessoas a raios UV.

Como vantagens do método de geração com luz UV, ao contrário de geradores de descarga Corona, não produzem nitrogênio como subproduto nocivo e, além disso, funcionam muito bem em ambientes com elevada umidade do ar. Também não existe, normalmente, uma necessidade de acessórios caros nem a necessidade de secadores de ar ou concentradores de oxigênio que constituem custos adicionais e requerem manutenção. São muito simples na sua concepção, não necessitam de preparação de ar e são ideais para pequenas aplicações, como pequenos viveiros, trabalho de laboratório, aplicações residenciais e eliminação de odores (WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD, 2012).

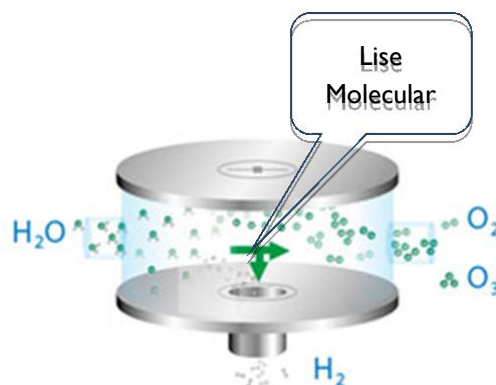
---

### 1.2.3. Eletrolítico

O método eletrolítico de geração de ozônio divide as moléculas de água em  $H_2$  e oxigênio, onde depois os átomos de oxigênio farão ligações  $O_2$  e  $O_3$ . Na maioria dos métodos eletrolíticos o gás de hidrogênio será removido para deixar o oxigênio e o ozônio como os únicos produtos da reação. O processo é apresentado na Figura 4.

Este método é de grande utilidade no tratamento e purificação de grandes volumes de água, a mesma água a ser desinfetada é a fonte de oxigênio para a geração de ozônio, conseqüentemente, nenhuma contaminação exterior é introduzida no sistema a ser tratado. O ozônio é dissolvido na água logo que ele é formado. Este método é independente da qualidade do ar, pois a água a ser tratada é utilizada como o substrato de partida (STANLEY, 2003).

Figura 4 – Método Eletrolítico de geração de ozônio



Fonte: (BIOWELL INFECTION CONTROL, 2013).

### 1.2.4. Plasma Frio

No método de plasma frio, o gás oxigênio puro é exposto a um plasma criado por uma descarga de barreira dielétrica. O oxigênio diatômico é dividido em átomos individuais, que em seguida, recombinam-se em trios para formar ozônio.

O método usa bastões de vidro preenchidos com gases nobres, excitados por alta tensão. A tensão entre as barras forma um campo eletrostático de plasma que transforma o oxigênio em ozônio. Uma vez que não há corrente apreciável, não há formação de arco ou desgaste. Assim, o gerador irá durar um tempo muito longo, apenas limitado pela qualidade do transformador (PLASMAFIRE INTL, 2012).

Este método produz quantidades muito maiores de ozônio em um determinado espaço de tempo, em comparação com o método de produção através de luz ultravioleta. No entanto,

como os geradores de plasma frio são muito caros, eles são encontrados com menos frequência do que os dois tipos anteriores (PLASMAFIRE INTL , 2012).

### 1.2.5. Resumo métodos de geração

Tabela 2 – Resumo modos de geração de ozônio

Método	Vantagens	Desvantagens
<b>Descarga Corona</b>	<p>Maior Eficiência energética (maior concentração de ozônio produzida).</p> <p>Volume reduzido e Portabilidade.</p> <p>Maior vida útil das câmaras de descarga em relação ao tempo de vida de lâmpadas UV.</p> <p>Tecnologia mais comum e principalmente empregada na indústria.</p>	<p>Segurança operacional para altas tensões.</p> <p>Necessidade de limpeza periódica.</p> <p>Produção de gases não desejados e contaminantes como óxidos de nitrogênio.</p>
<b>Luz Ultravioleta</b>	<p>Purificação de grandes volumes de água.</p> <p>Ideal para tratamento superficial ou águas paradas.</p> <p>Não produz nitrogênio como subproduto nocivo.</p> <p>São muito simples na sua concepção, não necessitam de preparação de ar e são ideais para pequenas aplicações.</p>	<p>Perigosa exposição raios UV.</p> <p>Necessidade de elevado tempo de exposição para completar a reação.</p> <p>Grande volume do equipamento, geralmente.</p> <p>Pouco prático para uso em situações de fluxos rápidos de ar ou água.</p> <p>Difícil Portabilidade.</p> <p>Vida útil reduzida das lâmpadas.</p>
<b>Eletrólítico</b>	<p>Purificação de grandes volumes de água.</p> <p>A mesma água a ser desinfetada é a fonte de oxigênio para a geração de ozônio</p>	<p>Custo da implementação.</p> <p>Elevadas potências nas câmaras de reação.</p>
<b>Plasma frio</b>	<p>Volume e portabilidade.</p> <p>Produz quantidades muito maiores de ozônio em um determinado espaço de tempo</p>	<p>Custo da implementação.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 1.3. Medição da concentração ozônio residual

Dentro das aplicações concernentes a esta pesquisa, se encontram aquelas que partem da utilização de água ozonizada para cumprir seus objetivos na purificação de água, em processos de lavanderia, limpeza e lavagem industrial, dentre outros. Assim, o ozônio dissolvido na água é conhecido como ozônio residual. Para medir a concentração de ozônio na

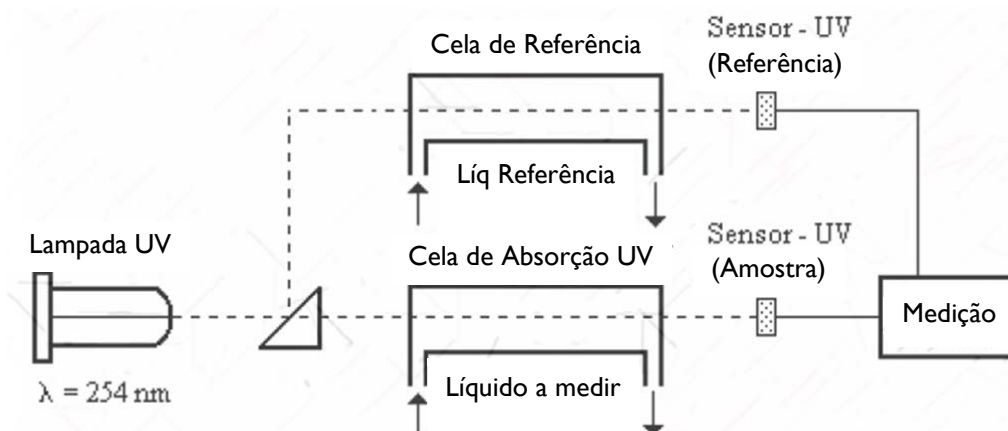
mistura gás-água existem diversos métodos, na sequência apresentam-se os mais comuns (SANTIAGO, 2005):

### 1.3.1. Absorção de luz UV

O método de absorção de luz UV também é conhecido como o método de fotometria UV, pode ser utilizado para medir a concentração de ozônio em um gás ou líquido. O procedimento é mostrado na Figura 5. Consiste em medir a atenuação de um feixe de luz UV com comprimento de onda de 254 nanômetros em uma célula de absorção, célula que contém uma amostra do líquido que se deseja medir. A atenuação do feixe de luz é determinada mediante a comparação do sinal proveniente do sensor da amostra e o proveniente do sensor de referência.

A magnitude da atenuação do feixe é proporcional à concentração de ozônio presente na amostra. O método de absorção de luz UV apresenta interferências com qualquer contaminante contido na amostra que absorva luz a 254 nanômetros. Com esta técnica podem-se medir concentrações até de 600 g/m<sup>3</sup> de ozônio na fase de gás e até 150 g/m<sup>3</sup> de ozônio residual na água.

Figura 5 – Diagrama monitor de ozônio por absorção de luz UV



Fonte: Adaptado de Santiago (2005).

A concentração de ozônio se calcula com a relação de Beer-Lambert, equação mostrada a seguir.

$$I_m = I_r e^{-L_{cela} C_{oz} \alpha_{mol}} \quad (6)$$

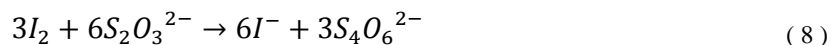
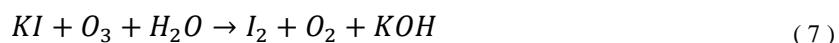
Onde:

- $I_m$  Atenuação do feixe de luz na célula de absorção.  
 $I_r$  Intensidade da luz de referência.  
 $\alpha_{mol}$  Coeficiente de absorção molar do ozônio a 0°C y 760 mmHg.  
 $L_{cela}$  Comprimento da célula de absorção.  
 $C_{oz}$  Concentração de ozônio.

Com um equipamento fotométrico genérico é possível identificar a presença e concentração do ozônio na água com a absorção da luz UV na amostra cujo ponto máximo se encontra centrada em 253,7nm, fato já conhecido da camada de ozônio encontrada na estratosfera que tem a propriedade de absorver a radiação ultravioleta do sol, principalmente a luz UV tipo C (entre 200nm – 280nm).

### ***1.3.2. Método Iodométrico***

Este método se utiliza para medir concentrações de ozônio em fase de gás ou em fase líquida. Para a medição da concentração de ozônio em fase gás primeiro se faz borbulhar um volume conhecido de um gás com ozônio dentro de uma solução de iodeto de potássio KI. Para realizar a medição do ozônio residual na fase líquida, simplesmente se mistura uma amostra do líquido a ser medido com a solução de KI. A reação produzirá iodo, o qual deve ser titulado imediatamente com tiosulfato de sódio  $Na_2S_2O_3$  a uma cor amarela pálida. A concentração de ozônio pode ser calculada pelo consumo de tiosulfato de sódio.



### ***1.3.3. Método Amperométrico***

O método amperométrico tem a possibilidade de ser empregado para medições contínuas e automatizadas de ozônio residual na água. O eletrodo de membrana para medição de ozônio residual está composto de um cátodo de ouro, um ânodo de prata, um eletrólito (AgBr,  $K_2SO_4$  ou KBr) e uma membrana de Teflon. A quantidade de aplicações e a exatidão variam dependendo do tipo de eletrodo empregado.

A operação deste tipo de dispositivos pode-se resumir da seguinte maneira: O ozônio dissolvido na água atravessa a membrana e o eletrólito até se colocar na superfície do cátodo.

Ao aplicar uma tensão diferencial entre os terminais do cátodo e ânodo, o ânodo liberará elétrons ao eletrólito, tais elétrons atravessarão o eletrólito até o cátodo, onde ao se encontrar com uma molécula de ozônio estas virarão oxigênio. O resultado é uma condução de corrente elétrica proporcional à concentração de ozônio dissolvido na água.

#### ***1.3.4. Colorimetria***

Existem dois métodos principais de colorimétrica para esta aplicação, os quais são apresentados na sequência.

N,N-Dietil-p-fenilenodiamina (DPD): Consiste em fazer reagir a amostra de água ozonizada com o composto DPD. Ao reagir o DPD com o ozônio contido na amostra de água, a água tomará uma coloração rosa. A tonalidade adquirida será proporcional à concentração de ozônio residual na amostra. A amostra deve ser comparada contra uma escala de ozônio residual que esteja graduada a distintas tonalidades de rosa.

Índigo carmim ( $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ ): O Índigo Carmim é um corante amplamente utilizado. O método de medição consiste em titular a amostra de água ozonizada com uma solução de Índigo carmim até que a água adquira a coloração azul da solução. A água tomará cor azul até que o ozônio contido na água seja consumido ao oxidar o corante, ou seja, a concentração de ozônio será proporcional à quantidade de Índigo carmim oxidado.

#### ***1.3.5. Método de medição escolhido para a aplicação***

Em relação à medição da concentração de ozônio residual na mescla gás-água gerada é viável a utilização de diferentes métodos nos laboratórios de química e física da UNESP no campus central de Ilha Solteira, entre eles fotometria ou reações químicas com iodo. Desta maneira, se teriam medições absolutas e com bom grau de precisão, mas o fato do rápido desaparecimento do ozônio residual da água impossibilita a utilização de métodos com equipamentos dos laboratórios citados, devido ao tempo necessário para o transporte até os laboratórios.

De acordo com as exigências do trabalho de realizar as medições diretamente no local, os métodos mais viáveis seriam o método de colorimetria e o método amperométrico, métodos que inicialmente dariam uma medição relativa entre experimentos em relação ao registrado no ozonizador comercial, admitido para comparações com a proposta a ser desenvolvida neste trabalho.



O método amperométrico tem a possibilidade de ser empregado para medições contínuas e automatizadas de ozônio residual na água, fato que representa outra vantagem na escolha deste método. Equipamentos ou experimentos com diferentes tipos de eletrodos e eletrólitos são viáveis e disponíveis comercialmente, mas com maior custo que as opções por colorimetria.

Com o método de colorimetria é possível medir a concentração de ozônio na mescla gas-água por unidade de volume de forma aproximada, a qual junto com o dado do caudal do ozonizador é possível conhecer as gramas de ozônio produzidas por unidade de tempo.

Desta forma, considerando-se o custo reduzido da técnica por colorimetria, foi adquirido um sistema para detecção de Ozônio 0,0-2,3 mg/l (100 testes), conforme dados acessíveis na URL: ([http://www.hannabrasil.com/suporte/downloads/doc\\_download/56-manual-hi-38054](http://www.hannabrasil.com/suporte/downloads/doc_download/56-manual-hi-38054)).

### 1.3.6. Resumo métodos de Medição

Tabela 3 – Resumo métodos de Medição

Método	Características operacionais
<b>Absorção de luz UV</b>	Método de fotometria UV. Consiste em medir a atenuação de um feixe de luz UV com comprimento de onda de 254 nanômetros em uma célula de absorção. A magnitude da atenuação do feixe é proporcional à concentração de ozônio presente na amostra. Podem-se medir concentrações até de 600 g/m <sup>3</sup> de ozônio na fase de gás e até 150 g/m <sup>3</sup> de ozônio residual na água.
<b>Método Iodométrico</b>	Reação química com KI. Para realizar a medição do ozônio residual na fase líquida, simplesmente se mistura uma amostra do líquido a medir com a solução de KI A concentração de ozônio pode ser calculada pelo consumo de tiosulfato de sódio.
<b>Método Amperométrico</b>	Variável de medição: corrente elétrica entre 2 eletrodos mergulhados. O resultado é uma condução de corrente elétrica proporcional à concentração de ozônio dissolvido na água.
<b>Colorimetria</b>	Reação química e comparação visual. Consiste em fazer reagir a amostra de água ozonizada com o composto DPD. Ao reagir o DPD com o ozônio contido na amostra de água, a água tomará uma coloração rosa. A tonalidade adquirida será proporcional à concentração de ozônio residual na amostra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 1.4. Aplicações gerais do ozônio

O ozônio é um poderoso desinfetante e oxidante importante para a purificação de água para o consumo humano e ar em ambientes fechados, geralmente, ou do meio ambiente em geral. Assim, também é utilizado para a fumigação e esterilização em salas de cirurgias em hospitais, desinfecção de alimentos para aumentar a vida de prateleira, terapia de ozônio, além de muitas aplicações científicas, médicas e industriais (VIJAYAN, PATIL, 2008).

O ozônio tem aplicações bactericida, germicida, virucida, fungicida e desodorizante, destruindo rapidamente estreptococos, estafilococos, *Escherichia coli*, etc. Também fortes toxinas como as da difteria e do tétano (RILIZE, 2011).

Na indústria de alimentos existe um grande interesse no uso do ozônio para aumentar a vida de prateleira e segurança dos produtos alimentares e na exploração de novas aplicações do desinfetante. O ozônio tem uma forte ação microbida contra bactérias, fungos, parasitas e vírus (KIM et al., 2003).

Muitos hospitais no mundo inteiro usam grandes geradores de ozônio para descontaminar salas de cirurgias, entre o atendimento de um paciente e o seguinte. Os quartos são limpos e selados hermeticamente antes de serem cheios de ozônio que efetivamente mata ou neutraliza todas as bactérias restantes presentes, mas esta prática não é recomendada pelo departamento nacional de saúde da Austrália, dado que os níveis de concentração de ozônio necessários para remover contaminantes, odores, vírus, bactérias, fungos ou outros poluentes biológicos em recintos fechados é maior que os limites máximos de exposição sem riscos para a saúde humana (ENVIRONMENTAL HEALTH, DEPARTMENT OF HEALTH, 2005). Assim, ozônio pode higienizar e desodorizar edifícios desabitados, quartos, canalizações, galpões de madeira, barcos e outros veículos ou lugares onde não seja iminente a ocupação de pessoas. O ozônio pode ser seguro e eficazmente utilizado na purificação de água (ENVIRONMENTAL HEALTH, DEPARTMENT OF HEALTH, 2005)..

Segundo (MONTECALVO, WILLIAMS, 2003) o ozônio dissolvido na água da torneira filtrada pode reduzir mais de 99,99% dos microrganismos prejudiciais para a saúde humana, como as salmonelas, *E. coli* e *Campylobacter*. Também o ozônio pode ser usado para remover os resíduos de pesticidas em frutos e vegetais.

Outro importante uso do ozônio está na preparação de produtos farmacêuticos (COHEN, 2013) e muitos outros compostos orgânicos comercialmente úteis, onde é usado para cortar ligações carbono-carbono em moléculas a tratar.

### ***1.4.1. Aplicações em processos de limpeza e lavação industrial***

O ozônio também pode ser utilizado para o branqueamento de substâncias e para matar microrganismos em fontes de ar e água. Muitos sistemas de água potável municipais exterminam as bactérias empregando  $O_3$  em vez de empregar cloro, método atualmente comum, mas com propriedades cancerígenas (STANLEY, 2003). O ozônio não forma compostos organoclorados, nem permanece na água após o tratamento. Um fato importante a considerar nos processos de tratamento de águas é que o ozônio pode formar a substância cancerígena bromato em fontes de água com concentrações elevadas de brometo (TYNAN et al, 1993).

Onde a energia elétrica é abundante, o ozônio é um método eficaz de tratamento de água, uma vez que é produzido sob demanda e não necessita de transporte e armazenamento de produtos químicos perigosos. Uma vez que se deteriora rapidamente, não deixa gosto ou odor na água potável.

Industrialmente, o ozônio é utilizado para (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 1996):

- Tratamentos ambientais, higienização e desodorização. Remoção de odores, fungos, bactérias e vírus. Síndrome do Edifício Doente. Desodorizar ar e objetos, tal como depois de um incêndio.
- Tratamento de água e piscinas. Desinfetar a água substituindo o cloro. Quimicamente atacar contaminantes na água (ferro, arsênico, gás sulfídrico, nitritos e compostos orgânicos complexos amontoados como "cor") (STANLEY, 2003).
- Ozônio terapia (terapia Ozônio) (A.T. EXPORT S.A., 2003).
- Erradicar parasitas transmitidos pela água, tais como, a *Giardia lamblia* e o *Cryptosporidium* em estações de tratamento superficial de água.
- Desinfetar lavanderia em hospitais, fábricas de alimentos, lares, etc. Este processo é amplamente utilizado na restauração de tecidos. Limpar e branquear tecidos (HOSTACHY, SERFASS, 2009).
- Lavar frutas e vegetais frescos para matar fungos, mofo e bactérias. Tirar fermentos e esporos de mofo do ar em plantas de processamento de alimentos. Matar as bactérias em alimentos ou em superfícies de contato. Matar insetos em grãos armazenados (XU, 1999).

- Fornecer uma ajuda para a floculação (aglomerado de moléculas, que ajuda na filtração, onde o ferro e o arsênio foram removidos).
- Fabricar compostos químicos mediante síntese química. Auxiliar na transformação do plástico para permitir a aderência de tintas.
- Na agricultura, o ozônio facilita a extração de alguns metais do solo, se o solo contaminado é pré-tratado com o ozônio, a eficácia de extração de Pb, Am e Pu aumenta (LESTAN et al., 2005).

O ozônio também é amplamente utilizado no tratamento de água em aquários e tanques com peixes. A sua utilização pode minimizar o crescimento de bactérias, controle de parasitas e eliminar a transmissão de algumas doenças (HONN et al., 1976). Mas o ozônio não pode ser empregado diretamente com peixes dentro do aquário, o ozônio pode atrofiar as brânquias tornando-os dependentes de água com altos níveis de oxigênio para sobreviver, a ozonização pode ser utilizada em aquicultura para facilitar a decomposição orgânica (SUMMERFELT, HOCHHEIMER, 1997).

O ozônio também é adicionado a sistemas de recirculação para reduzir os níveis de nitrito por meio da conversão em nitrato. Se os níveis de nitrito na água são altos, os nitritos também se acumulam no sangue e tecidos de peixe, onde interfere com o transporte de oxigênio fazendo hemoglobina incapaz de se ligar ao  $O_2$  (SUMMERFELT, HOCHHEIMER, 1997).

## **1.5. Motivação e Proposta da tese**

O uso do conversor eletrônico proposto neste trabalho, considerando-se a geração de campos elétricos com elevadas tensões e frequências, é para produção de ozônio dissolvido em água destinada a aplicações industriais de higienização e lavagem de recipientes de conteúdo líquido, equipamentos e grandes instalações de reserva de líquidos, com ação germicida, lavagem eficiente e sem resíduos, em substituição ao uso de agentes químicos de lavação.

Equipamentos comerciais usados para a lavação na indústria química e na indústria de alimentos líquidos empregam geralmente múltiplas câmaras coaxiais de descarga, onde se tem um conversor chaveado para cada câmara. Com o objetivo de homogeneizar e estabilizar a produção de ozônio e melhorar a eficiência do sistema, se propõe o emprego de um único conversor chaveado para múltiplas câmaras em paralelo, buscando a melhoria da eficiência na

produção de  $O_3$ . A frequência de operação dos conversores nos equipamentos comerciais normalmente são baixas, com curta duração do pulso de alta tensão, ou seja, razão cíclica baixa e conseqüentemente pouca eficiência na produção de ozônio. Logo, efetuar o estudo das necessidades (níveis) e implementar processo baseado na geração de tensão em níveis adequados e em alta frequência, de modo a garantir uma grande densidade de produção de  $O_3$ , faz parte desta proposta.

No entanto, trabalhar em frequências maiores pode ocasionar o aumento das perdas de comutação, podendo reduzir muito a eficiência do conversor, ainda mais para baixas potências de operação. Se propõe então usar um conversor chaveado ressonante para o estágio de saída, permitindo que as comutações sejam não dissipativas nas chaves, minimizando assim as perdas por comutação e permitindo trabalhar com frequências elevadas, sustentando os pulsos elétricos necessários nas câmaras e obtendo maior eficiência energética no processo. Além disso, operação em frequências maiores favorece também na redução do peso e volume da estrutura como um todo e do transformador elevador. Considerando o MCD para o estágio retificador boost de entrada, são também reduzidas as perdas em comutações, principalmente do diodo boost que comutará com corrente nula. Desta forma, o conjunto retificador boost e inversor Full-Bridge Phase-shift, associado ao modelo equivalente do transformador (incluindo-se os elementos passivos associados ao primário do transformador elevador: indutor e capacitores ressonantes) com as câmaras de descarga, resultam em um conversor ressonante.

A modulação utilizada na ponte de saída permite um controle da corrente imposta no circuito ressonante equivalente (indutor, capacitor, transformador elevador e câmaras), gerando deslocamentos entre tensões e correntes em cada chave, obtendo comutação com tensão zero (ZVS) em um braço e comutação com corrente zero (ZCS) no outro, minimizando as perdas de comutação. Esta técnica possibilita trabalhar em frequências mais altas, com melhor sustentação da tensão nas câmaras de descarga e razão cíclica efetiva mais elevada, resultando em uma maior produção de ozônio.

Considerando os equipamentos comerciais no Brasil, por não haver uma normatização, geralmente operam com baixo fator de potência. Desta forma, foi proposto para o estágio de entrada um pré-regulador de tensão com correção do fator de potência (retificador Boost), fornecendo um barramento CC de modo a atender as normas internacionais de distorção harmônica total (DHT) para a corrente de entrada. Sendo assim, a proposta consiste de uma

estrutura de dois estágios, para a qual deseja-se ter eficiência elevada em cada um dos estágios, garantindo-se um alto rendimento global para o sistema proposto.

É importante salientar que apesar do alto nível de tensão de saída do conversor desenvolvido, ela ocorre somente nas câmaras de descarga, devido ao transformador elevador, reduzindo os esforços de tensão nos semicondutores, sendo isto uma vantagem. O circuito eletrônico irá operar com tensões máximas em torno da tensão de barramento do sistema. Assim, é possível ter segurança operacional, dado que acesso aos contatos das câmaras de descarga não é fácil, como já é de prática nos geradores de ozônio comerciais que utilizam o efeito Corona.

## 1.6. Conclusões

Na indústria, o método mais comum para a geração de ozônio é o método da descarga corona, onde pulsos de alta tensão a determinada frequência quebram as ligações entre os átomos do gás de oxigênio causando a formação de Ozônio.

Uma das maiores aplicações dos campos elétricos pulsados na indústria é a geração de ozônio.

O ozônio atmosférico encontra-se em estado puro em diferentes concentrações entre os 10 e 40 km sobre o nível do mar (zona conhecida como a camada de ozônio), tendo a concentração mais alta perto dos 25 km.

As duas maneiras principais de geração de ozônio na natureza e na indústria são: primeiro a partir da incidência de raios ultravioleta, dando início a reações fotoquímicas, e segundo, a partir de pulsos elétricos de alta tensão no gás de oxigênio  $O_2$ ; as duas maneiras quebram as ligações de  $O_2$  liberando átomos de oxigênio que depois se recombinam para gerar  $O_3$ .

O método de descarga corona produz a maior concentração de ozônio gerada possível quando comparada com qualquer outro tipo de geração industrial ou comercial de ozônio.

O  $O_3$  é um poderoso desinfetante e oxidante importante para a purificação de água para o consumo humano e do ar em ambientes habitados ou no meio ambiente em geral, tendo ações bactericida, germicida, virucida, fungicida e desodorizante.

O ozônio é muito instável, reduzindo a sua quantidade na mistura gas-água em um 50% a cada 10 minutos aproximadamente, o que significa que em 30 minutos se teria menos de 15% do ozônio total inicialmente gerado, o que faz necessário que a medição e a aplicação

---

seja feita no mesmo local de produção, excluindo-se a alternativa de tomar amostras para levar ou transportar a mistura a outro lugar afastado.

O método amperométrico de medição de concentração de ozônio residual tem a possibilidade de ser empregado para medições contínuas e automatizadas de ozônio residual na água, fato que representa outra vantagem na escolha deste método. Equipamentos ou experimentos com diferentes tipos de eletrodos e eletrólitos são viáveis e disponíveis comercialmente, mas com maior custo que as opções por colorimetria, fato que para os recursos e objetivos deste trabalho, levou-nos a escolher os métodos por colorimetria como a melhor opção para avaliação da concentração de  $O_3$  em água, para o protótipo a ser desenvolvido e para a comparação com equipamento comercial.

---

---

## 2 CONVERSORES ELETRÔNICOS PARA OBTENÇÃO DE OZÔNIO

Como já apresentado, o método mais comum para a geração de ozônio e objeto da presente pesquisa é o método da descarga Corona, onde pulsos de alta tensão a determinada frequência quebram as ligações entre os átomos do gás de oxigênio, causando a formação de Ozônio (WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD, 2012). Uma das maiores aplicações dos campos elétricos pulsados na indústria é a geração de ozônio (SHIMOMURA et al., 2003).



Dando mais profundidade ao assunto deste método, pode-se verificar que atualmente são estudadas novas estruturas geradoras de pulsos elétricos, novos tipos de transformadores elevadores de tensão, novas configurações das câmaras de descarga e alternativas de conversores para o melhor aproveitamento da energia elétrica empregada. Sempre partindo da fundamentação de que, quanto maior a tensão dos pulsos maior será a quantidade de ozônio produzida, mantendo a frequência dos pulsos constante (HONN et al., 1976). Por outro lado, quanto maior a frequência dos pulsos maior será a quantidade de ozônio produzida, mantendo a tensão dos pulsos constante (KETKAEW, 2007).

Uma pesquisa feita no Japão documenta o estímulo base deste trabalho, que consiste em melhorar o aproveitamento da energia elétrica em processos industriais de geração de ozônio pelo método de pulsos elétricos. A pesquisa mostra a redução do consumo de energia elétrica nas plantas de tratamento de água potável em comparação com plantas de ozonização e outros tipos de plantas. Concluiu-se então que o consumo de energia elétrica dos sistemas de ozonização pode ser reduzido através de maiores estudos na tecnologia empregada para tal fim, além de possíveis melhorias que podem ser feitas também nos reatores de ozônio e na reação eletroquímica. A partir disto propõe-se, considerando a gestão ambiental total, que deve ser enfatizado tanto a investigação técnica do processo de ozonização, quanto para as soluções para a redução da energia total consumida pelo processo (MAGARA et al., 1995).

A parte final do sistema, onde serão aplicados os pulsos de tensão e será gerado o ozônio é a câmara de tratamento, podendo ser câmaras de eletrodos laminares paralelos, câmaras paralelas de eletrodos como condutores enrolados, câmaras de eletrodos cilíndricos concêntricos e câmaras com cilindro externo e fio interno como eletrodos são os tipos mais

---



---

comuns na indústria e os mais estudados. No presente trabalho são empregadas câmaras com cilindro externo e fio interno como eletrodos (câmara coaxial), sendo tais câmaras mais comuns e amplamente estudadas por sua simplicidade.

Considerando câmaras de eletrodos laminares paralelos ou fios condutores paralelos, Jenei & Kiss analisam diferentes arranjos, configurações e disposições dos eletrodos e eletrodos auxiliares na produção de ozônio, mostrando que grandes variações na capacidade de produção de ozônio ocorrem em uma ampla gama de geometrias e configurações da fonte de alimentação, e que a capacidade de produção de ozônio pode ser mais eficaz com configurações especiais de eletrodos auxiliares do que o mero método de descarga superficial (JENEI, KISS, 2005).

Para as câmaras coaxiais, Yanallah et al. propõe uma abordagem analítica para determinar as distribuições radiais de campos elétricos, os elétrons, a densidade de íons e temperatura de uma descarga corona, usando o oxigênio como gás de alimentação. Assim, o seu estudo fornece soluções analíticas aproximadas da descarga corona com baixo custo computacional, podendo ser útil em diversas aplicações tecnológicas: como a geração de ozônio ou a decomposição de gases poluentes (YANALLAH et al., 2012).

Estudos analíticos similares e modelagem numérica apresentada por Nilsson & Eninger concluem que a eficiência na produção de ozônio aumenta quando a densidade do gás fornecido é aumentado, e aumenta também quando a temperatura inicial do gás é reduzida (NILSSON, ENINGER, 1997).

Em relação às características dos pulsos, quanto maior a sua frequência, maiores serão os campos elétricos possíveis (com a mesma Potência) a serem aplicados para o espaço de descarga, melhorando o tratamento e a produção (SHIMOMURA et al., 2003). Assim, Fukawa et al. desenvolve um gerador de energia pulsada com uma largura de pulso em nano segundos aplicado à produção de ozônio. Concluindo, dentre outras coisas, que encurtar a largura do pulso, ao incrementar a frequência, melhora a eficiência da produção de ozônio (FUKAWA et al., 2008).

Em uma pesquisa relacionada, o efeito do número de câmaras em paralelo é analisado, onde é avaliada a alternativa de ligar câmaras em paralelo em vez de construir câmaras de maiores dimensões. Conclui-se que uma ligação em paralelo induz uma distribuição mais uniforme da descarga de energia em cada câmara, reduzindo o risco de formação de arcos elétricos no interior. A pesquisa concluiu também que quanto maior a frequência dos pulsos maior é a concentração de ozônio obtida (FUKAWA et al., 2004).

---

---

Neste contexto, este trabalho utilizará o conceito de paralelismo das câmaras (no caso específico, um conjunto de 14 câmaras), com a finalidade de uniformização da produção de ozônio, conforme se descreverá nos capítulos seguintes.

Nakata et al., estudaram os efeitos da separação entre eletrodo em um reator coaxial para melhorar a concentração de ozônio produzido usando pulsos elétricos de curta duração em nano segundos. Concluíram que a concentração de ozônio e o rendimento aumentam com a diminuição do diâmetro interno do eletrodo exterior da câmara coaxial (NAKATA et al., 2013). Em outra pesquisa do mesmo grupo concluíram que a concentração de ozônio aumenta na proporção de energia depositada, mas mantendo a produção total quase constante para a energia empregada. A concentração de ozônio diminui com o tempo depois de atingir um pico. As descargas de faíscas que incrementaram com a diminuição da separação entre eletrodos causam elevação de temperatura nos eletrodos e nos gases, além de decomposição térmica de moléculas de ozônio (MABUCHI et al., 2012).

Hosselet, em sua pesquisa sobre a eficiência na produção de ozônio por descargas elétricas, concluiu que aplicando uma tensão maior aumenta a produção de ozônio, mas a eficiência elétrica do conversor empregado diminui. Em relação à velocidade do fluxo de ar injetado concluiu que incrementando a velocidade do ar (a uma determinada tensão de tratamento) a produção de ozônio aumenta, atingindo um máximo e depois diminuindo. Tal redução é devida em parte ao fato de que a tensão aplicada também começa a quebrar as ligações atômicas já feitas nas moléculas do ozônio gerado. Em relação à frequência dos pulsos concluiu-se que uma frequência maior resulta em um aumento da produção de ozônio (HOSSELET, 1973).

Em outras pesquisas, Sung et al. obtêm conclusões similares e complementares em tratamentos com câmaras coaxiais e campos elétricos pulsados, concluindo que uma forma de onda bipolar da tensão aplicada resulta em maior concentração de ozônio e maior eficiência de produção que uma tensão monopolar, independentemente da razão cíclica. Uma razão cíclica maior incrementa ligeiramente a concentração de ozônio para uma tensão monopolar, ao mesmo tempo em que afeta pouco a eficiência da produção de ozônio para qualquer polaridade de tensão. Para uma razão cíclica constante, a concentração de ozônio diminui com o aumento da taxa de fluxo de oxigênio, no entanto, a eficiência máxima de produção de ozônio para cada vazão mostra apenas uma pequena diferença em relação à mudança na taxa de fluxo. Assim, a eficiência da produção de ozônio depende mais das características dos pulsos de tensão e menos da taxa de fluxo de oxigênio (SUNG et al., 2013).

---

---

Em estudos similares e anteriores, Samaranyake et al. concluíram também que a produção de ozônio aumenta com a diminuição da taxa de fluxo do gás de entrada. A concentração de ozônio aumenta com a diminuição da distância entre eletrodos (ou diminuído o raio da câmara coaxial) com uma tensão aplicada, com uma frequência de pulsos e uma taxa de fluxo de gás fixas (SAMARANAYAKE W. J. et al., 2000).

Em um caso de estudo específico, Samaranyake et al. também concluíram em um experimento com tensão constante, frequência de pulsos constante (100Hz) e câmaras coaxiais de diferentes diâmetros, que a mais alta concentração de ozônio é obtida em uma câmara de 16mm de raio (SAMARANAYAKE W. J. et al., 1999). Em estudos similares conclui-se que a concentração de ozônio aumenta com o aumento da tensão pulsada aplicada para baixas frequências de pulsos (SAMARANAYAKE W. J. et al., 1999). O rendimento na produção de ozônio (medido em g/kWh) é fortemente dependente da concentração de ozônio e, por conseguinte, do pico de tensão pulsada aplicada e da frequência dos pulsos. Portanto, tratamento com o método de descarga Corona com pulsos positivos em uma barreira dielétrica têm mostrado resultados significativos para aplicações industriais, utilizando-se ozonizadores com câmaras cilíndricas coaxiais (SAMARANAYAKE W. J. et al., 2000).

Em relação ao tipo de gás de entrada ao sistema, concluiu-se que a produção de ozônio a partir do gás de oxigênio O<sub>2</sub> puro é maior do que a obtida com ar seco (o ar está composto em sua maioria por nitrogênio). O rendimento na produção de ozônio (em g/kWh) aumenta com a redução de ozônio na mistura de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> do ar (SAMARANAYAKE W. J. et al., 2001).

Chen & Wang avaliaram, a partir de modelos numéricos, o efeito da umidade relativa da fonte de ar na distribuição de elétrons livres e na produção de ozônio no método da descarga Corona, concluindo que a taxa de produção de ozônio diminui com o aumento da umidade relativa, devido à remoção de oxigênio atômico útil por moléculas de água (CHEN, WANG, 2005).

Em relação ao fluxo do gás que entra no sistema, para cada câmara, existe uma taxa de fluxo ótima única que resulta na produção da concentração máxima de ozônio, se a taxa de fluxo é aumentada além ou diminuída abaixo deste valor ideal, a concentração de ozônio cai (AMJAD, SALAM, 2013).

---

## 2.1. Fonte geradora dos pulsos de tensão

No estado da arte, as fontes geradoras dos pulsos de tensão são geralmente divididas em três partes principais: a constituição de um barramento CC inicial, uma estrutura inversora ou geradora dos pulsos e finalmente uma estrutura elevadora ressonante ou um transformador elevador de pulsos também ressonante ou não, por exemplo, conforme mostrado na Figura 6.

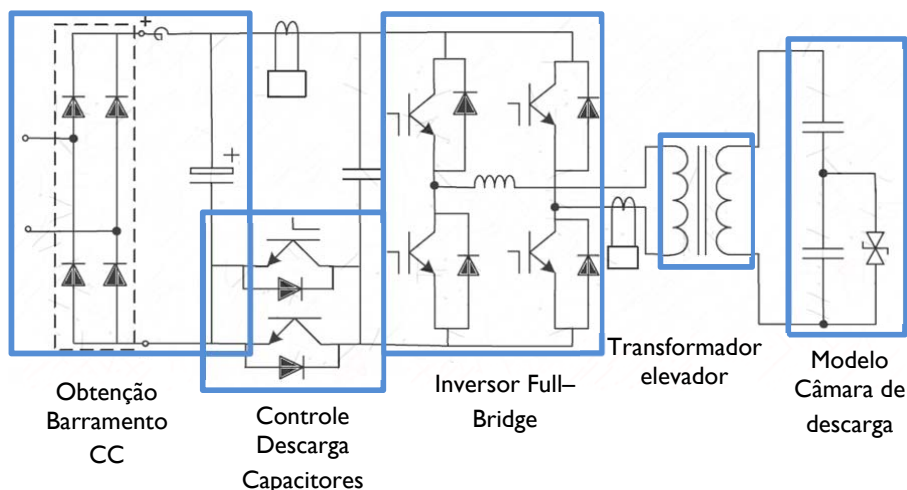
Em relação à fonte geradora do barramento CC não existe grande detalhe sobre as topologias ou configurações empregadas, mas pode-se supor que são fontes comerciais ou mesmo a rede de CA convertida para CC através de um retificador. Em geral estas fontes devem fornecer as tensões e potência necessárias para depois gerar os pulsos de alta tensão requeridos. Uma característica importante deste trabalho é a proposta e a construção de um conversor de energia com correção ativa do fator de potência, com o objetivo de maximizar a eficiência elétrica da fonte e assim dos pulsos elétricos gerados, sendo tal estrutura apresentada e analisada em detalhe no capítulo 3.

Para aplicações em baixas potências, em relação à maneira de gerar os pulsos ou de chavear a tensão, são comumente empregadas estruturas de só uma chave semelhante a estruturas Flyback em série com o primário de um transformador elevador de pulsos ou estrutura ressonante. É conhecido que os pulsos bipolares são mais efetivos na geração de ozônio (SUNG et al., 2013), assim várias pesquisas propõem a utilização de estruturas inversoras Full-bridge para a geração de pulsos bipolares (inversores Full-bridge PWM ou Full-bridge phase-shift PWM). Assim, Chao et al. propõe uma topologia mostrada na Figura 6, com comutação suave, baseada em um controle phase-shift (controle por deslocamento de fase) para a geração de ozônio, onde dois dispositivos de comutação e um capacitor com baixas perdas baseado em um inversor Full-bridge são envolvidos para alcançar comutações ZVS (Zero Voltage Switching, chaveamento em tensão nula, por sua sigla em inglês) e ZCS (Zero Current Switching, chaveamento em corrente nula, por sua sigla em inglês) (CHAO et al., 2011).

Hothogkham e Kinnares realizam nos seus trabalhos a análise e o modelamento de uma estrutura similar à anterior. Estrutura também baseada em uma ponte inversora Full-bridge que pode trabalhar como um inversor PWM básico ou como um inversor PWM phase-shift, a Figura 7 mostra a estrutura proposta (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010). Uma análise comparativa entre estas duas formas de controle é feita por Hothogkham concluindo que a

ponte com controle PWM phase-shift tem vantagens em relação à tensão de saída e a concentração de ozônio gerado em comparação como a ponte PWM básica.

Figura 6 – Estrutura proposta por Chao



Fonte: Modificado pelo autor (Chao, Zhiqiang, & Yandong, 2011).

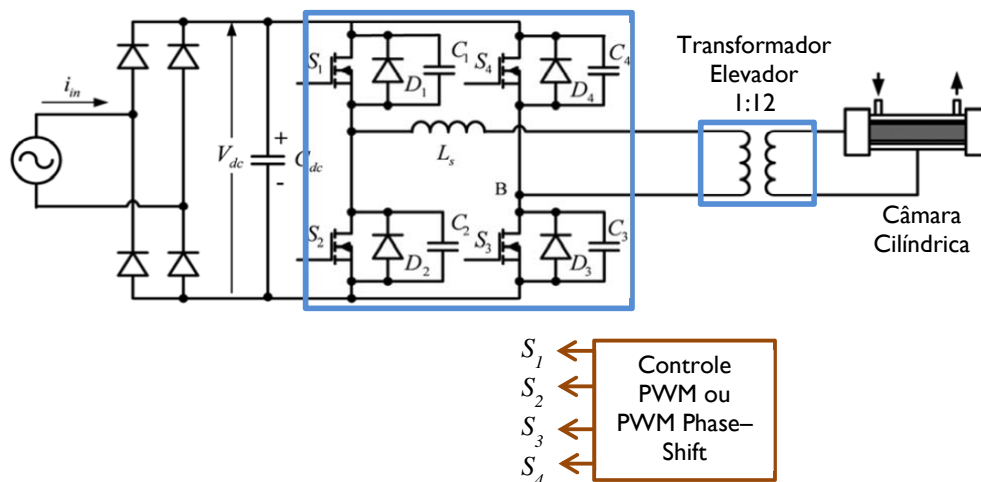
O inversor com controle PWM phase-shift permite manter constante a tensão aplicada na câmara para variações de frequência. Em um inversor PWM convencional, a tensão de saída diminui com o incremento da frequência de chaveamento, devido ao efeito da alta frequência sobre o transformador elevador, por isto não é conseguido um incremento na produção de ozônio ao incrementar a frequência. O controle PWM phase-shift soluciona este problema, além de manter a tensão na saída, aumenta a produção de ozônio ao incrementar a frequência de chaveamento (HOTHONGKHAM et al., 2011).

A estrutura proposta anteriormente inclui um indutor ressonante  $L_s$ , componente que é empregado para reduzir ou simplesmente fixar a frequência de ressonância do conjunto transformador – câmara, sintonizando-a em um intervalo adequado. O intervalo da frequência de ressonância é considerado com base na minimização de perdas e maximização da produção de ozônio.

Uma elevada frequência de ressonância pode incrementar as perdas da fonte, afetar a regulação do transformador e a produção de ozônio, o que implica aquecimento do sistema. Assim, no experimento realizado por HOTHONGKHAM et al. foi considerado aceitável o ajuste da frequência de ressonância em uma faixa igual o menor a 40kHz, com a inclusão de um indutor série. Considerando a operação do conversor ressonante, a frequência de operação deve ser igual ou maior que a frequência de ressonância escolhida, para que sempre ocorra

comutação com tensão nula (ZVS) em um dos braços e comutação com corrente nula (ZCS) no outro braço da ponte inversora.

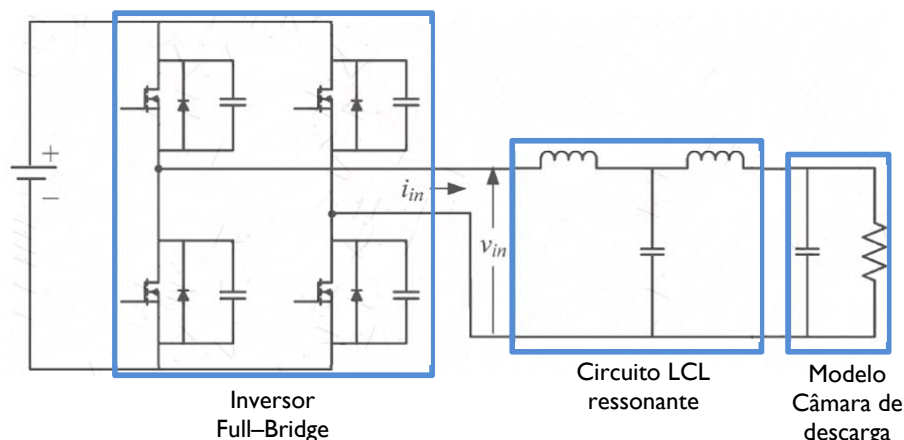
Figura 7 – Estrutura analisada por Hothogkham e Kinnares



Fonte: Modificado pelo autor (Hothongkham, Kongkachat, & Thodsaporn, 2011).

Amjad apresenta uma proposta na Figura 8 semelhante à anterior, onde a fonte de alimentação para gerar a alta tensão consiste em um inversor de ponte completa e um circuito ressonante.

Figura 8 – Estrutura proposta por Amjad



Fonte: Modificado pelo autor (Amjad & Salam, 2013).

Na estrutura da Figura 8 os transistores da ponte Full-bridge têm diodos de roda livre e são chaveados para produzir uma tensão bipolar com forma de onda quase quadrada como entrada para o circuito ressonante LCL (indutor – capacitor – indutor). O circuito de controle que fornece o sinal de chaveamento para os transistores da ponte consiste em dois detectores de cruzamento por zero. A fase entre tensão e a corrente do inversor é comparada pelo

microcontrolador através das ZCDs (detectores de cruzamento por zero, por sua sigla em inglês), e a frequência de chaveamento é ajustada para assegurar que o conversor esteja operado em chaveamento com tensão nula (ZVS) (AMJAD, SALAM, 2013).

Em relação à maneira de gerar a alta tensão pulsada ou à maneira de elevar os pulsos elétricos, foi encontrada em diferentes trabalhos a utilização de transformadores elevadores de pulsos, transformadores piezoelétricos para elevação de pulsos de curta duração (nanossegundos) (ALONSO et al., 2009), transformadores de pulsos em cascata para a obtenção da amplificação requerida de até 25 vezes, dependendo das aplicações.

Circuitos ressonantes LCL ou circuitos ressonantes onde a ressonância é conseguida entre a indutância de dispersão do transformador elevador e a impedância das câmaras de descarga são também utilizados para a obtenção de elevadas tensões de saída. O ganho obtido com a utilização destes circuitos ressonantes resulta na obtenção de altas tensões sem a necessidade de um transformador elevador (AMJAD, SALAM, 2013).

Amjad & Salam propõe no seu trabalho uma técnica em que a concentração pode ser mantida mesmo tendo aumentos na taxa de fluxo de ar de entrada, com um controle que incrementa a frequência dos pulsos em um inversor Full-bridge, realimentando o valor da concentração de ozônio. As câmaras coaxiais são ligadas em paralelo e a elevação dos pulsos é feita a partir de uma estrutura LCL ressonante (AMJAD, SALAM, 2013).

## **2.2. Ensaios com ozonizador comercial**

O sistema ozonizador mostrado na Figura 9 foi adquirido pelo LEP-Laboratório de Eletrônica de Potência, FE/IS-UNESP, com dois objetivos principais: dispor de um sistema totalmente funcional e comercial gerador de campos elétricos pulsados (CEP), para a análise de suas principais características, considerando a aplicação na produção de ozônio injetado em fluxo de água para fins de limpeza/higienização industrial, e, possibilitar uma plataforma de comparação para os resultados experimentais a serem obtidos com o protótipo proposto neste trabalho, no que se refere a estrutura de processamento da energia elétrica e em sua aplicação na produção de ozônio (eficiência na produção de ozônio).

Portanto, apresentam-se a seguir os principais parâmetros para o referido produto comercial, os quais servirão de base para as comparações com os resultados a serem obtidos com a implementação da proposta deste trabalho, no sentido de melhorar consideravelmente a

eficiência elétrica do processamento da energia elétrica, assim como, possibilitar o aumento da concentração de ozônio no fluxo de água produzido pelo sistema.

Observa-se que o ozonizador comercial analisado, em seus dados de catálogo, promete uma concentração injetada de até 20 gramas de ozônio por hora.

### ***2.2.1. Características elétricas do ozonizador***

Para os ensaios elétricos nos circuitos geradores de pulsos do equipamento comercial foi utilizado um analisador da energia, com o objetivo de medir para o arranjo completo os principais parâmetros de entrada: Tensão, corrente, potência ativa, potência aparente, fator de potência e conteúdo harmônico da corrente de entrada.

Figura 9 – Sistema Ozonizador Comercial



Fonte: (© Electronic shop.).

Apresenta-se o resumo das medições elétricas de entrada do arranjo completo, composto por 14 conversores e 14 câmaras (excluindo sistema da bomba de água), na Tabela 4.

### ***2.2.2. Unidade geradora de pulsos***

O sistema está composto por 14 câmaras de descarga ligadas em paralelo. Entretanto, cada câmara é atacada por um circuito elétrico gerador de campos elétricos pulsados individual, ou seja, são no total 14 unidades geradoras de pulsos.



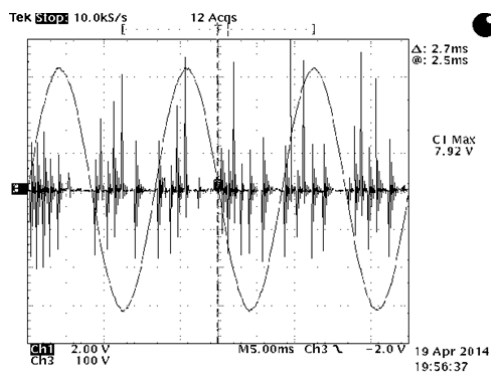
Tabela 4 – Ensaios Elétricos Ozonizador Comercial

Ensaios Elétricos Ozonizador Comercial		
$P_{in}$	Potência ativa de entrada [W].	128
$Q_{in}$	Potência reativa de entrada [var].	165
$S_{in}$	Potência aparente de entrada [VA].	208
$FP_{in}$	Fator de Potência de entrada	0,61
$V_{in\ rms}$	Tensão eficaz de entrada [Vrms].	220
$I_{in\ rms}$	Corrente eficaz de entrada [Arms].	0,95
$f_r$	Frequência da rede [Hz].	60

Fonte: Testes feitos pelo autor.

Em relação a cada circuito gerador do ozônio, eles estão gerando (com a sua câmara como carga) pulsos entre 7kV e 8kV na região de máximas amplitudes, tendo uma distribuição de amplitudes senoidal. Ou seja, a amplitude dos pulsos seguem o formato senoidal, ocorrendo entre 6 e 8 pulsos significativos a cada meio ciclo da rede, (20 pulsos no total por ciclo, para uma frequência dos pulsos de 1,25kHz, tempo entre pulsos 800 $\mu$ s aproximadamente). A Figura 10 mostra o padrão de pulsos gerado pelo conversor comercial em um período de 50ms, tomando como referência a tensão da rede de entrada.

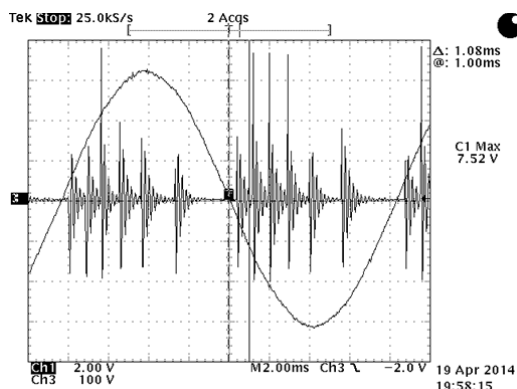
Figura 10 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial



Fonte: Dados experimentais do autor (escala Ch1: 1V=1kV).

A Figura 11 mostra um detalhe dos pulsos gerados em um período de 20ms onde pode-se observar a pouca uniformidade dos pulsos em relação a sua amplitude e a sua frequência. No início de cada semiciclo o conversor apresenta uma maior concentração de pulsos gerados, diminuindo a frequência dos mesmos ao longo do tempo, até aumentar novamente no começo do semiciclo seguinte.

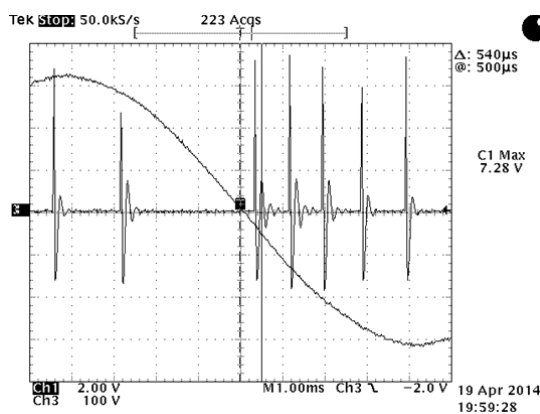
Figura 11 – Detalhe dos Pulsos gerados pelo conversor comercial



Fonte: Dados experimentais do autor (escala Ch1: 1V=1kV).

Na Figura 12 pode-se observar em detalhe o decaimento rápido dos pulsos gerados e o rápido amortecimento do sinal, dando uma ideia da limitada densidade de energia fornecida às câmaras de descarga para o processo de geração de ozônio. Em relação à polaridade dos pulsos pode-se observar uma maior tensão positiva do que a parte negativa em cada pulso, limitando assim a capacidade de geração de pulsos bipolares equivalentes.

Figura 12 – Detalhamento dos Pulsos gerados pelo conversor comercial



Fonte: Dados experimentais do autor (escala Ch1: 1V=1kV).

O circuito não faz retificação, aparentemente é uma estrutura Flyback com transformador elevador de pulsos, chaveando a tensão de entrada senoidal. Os pulsos não são bipolares, são pulsos ressonantes onde a parte negativa apresenta sempre amplitude amortecida e inferior à magnitude da parte positiva, sendo que a largura dos mesmos não supera os 10µs.

### 2.3. Conclusões

Uma das maiores aplicações dos campos elétricos pulsados na indústria é a geração de ozônio.

O método mais comum industrialmente para a geração de ozônio (e objeto da presente pesquisa) é o método da descarga Corona.

Pulsos de alta tensão e alta frequência são efetivos na geração de ozônio, quanto maior a tensão dos pulsos maior será a quantidade de ozônio produzida, mantendo a frequência dos pulsos constante. E quanto maior a frequência dos pulsos maior será a quantidade de ozônio produzida, mantendo a tensão dos pulsos constante.

A eficiência na produção de ozônio aumenta quando a densidade de oxigênio no gás de entrada aumenta, e aumenta também quando a temperatura inicial do gás é reduzida.

Reduzir a umidade do gás de entrada (ar) aumenta a eficiência na produção de ozônio.

Aumentar a frequência dos pulsos (reduzir a largura dos pulsos) melhora a eficiência da produção de ozônio. Quanto mais curtos os pulsos (ou seja, maior sua frequência) maiores campos elétricos são possíveis (com a mesma Potência) para serem aplicados nas câmaras de descarga, melhorando assim a produção (concentração de ozônio) e o tratamento da aplicação (ação germicida). Assim, quanto maior a frequência dos pulsos maior será a concentração de ozônio obtida.

Uma ligação em paralelo das câmaras de descarga resulta numa distribuição uniforme da descarga de energia em cada câmara, reduzindo ainda o risco de formação de arco elétrico quando comparada com estrutura com uma única câmara de descarga (maior e equivalente).

A concentração de ozônio e o rendimento de sua produção aumentam com a diminuição do diâmetro interno do eletrodo exterior da câmara coaxial, ou seja, diminuindo a separação dos eletrodos de descarga.

A ponte inversora com controle PWM phase-shift tem vantagens em relação à tensão de saída e a concentração de ozônio gerado, em comparação como a básica ponte PWM, considerando a operação ressonante com ciclos positivos e negativos (bipolares e regulares).

Uma elevada frequência de ressonância pode incrementar as perdas da fonte por efeitos das comutações, principalmente, afetando ainda a regulação do transformador. Logo, afetando a produção de ozônio e aumentando as perdas no sistema, tem-se a redução da vida útil do conversor e redução da eficiência na produção de ozônio.

---

O intervalo da frequência de ressonância é considerado com base na minimização de perdas e maximização da produção de ozônio, considerando-se a possibilidade de comutações não dissipativas e ajuste adequado da frequência dos pulsos, respectivamente.

Sendo a frequência de operação (frequência de comutação dos semicondutores/chaves do estágio inversor) maior ou igual, preferivelmente igual, que a frequência de ressonância do circuito, tem-se a possibilidade da operação em chaveamento com tensão nula (ZVS) e chaveamento com corrente nula (ZCS), para os braços da ponte inversora ressonante.

Neste sentido, este trabalho propõe utilizar uma estrutura Full-bridge inversora ressonante, com controle phase-shift e transformador elevador, obtendo-se pulsos bipolares e regulares. A novidade adicional à literatura no estado da arte, proposta neste trabalho, é acrescentar um estágio de entrada retificador Boost com correção ativa do fator de potência, operando no modo de condução descontínua, utilizando-se um único conversor de dois estágios (retificador boost com elevado FP + inversor ressonante full-bridge phase-shift) para alimentar as 14 câmaras de descarga associadas em paralelo.

O sistema comercial admitido para comparações é composto por 14 câmaras de descarga ligadas eletricamente de maneira independente, cada câmara é atacada por um circuito elétrico gerador de campos elétricos pulsados, resultando num total de 14 unidades geradoras de pulsos. Tal fato poder levar a não uniformidade da produção de ozônio em cada uma das câmaras, além de resultar em elevado volume para o conjunto dos "pulsadores".

De acordo com as características químicas do ozônio é uma exigência realizar as medições de concentração obtida diretamente no local, devido a sua rápida decomposição, assim, o método admitido para os ensaios comparativos é o por calorimetria.

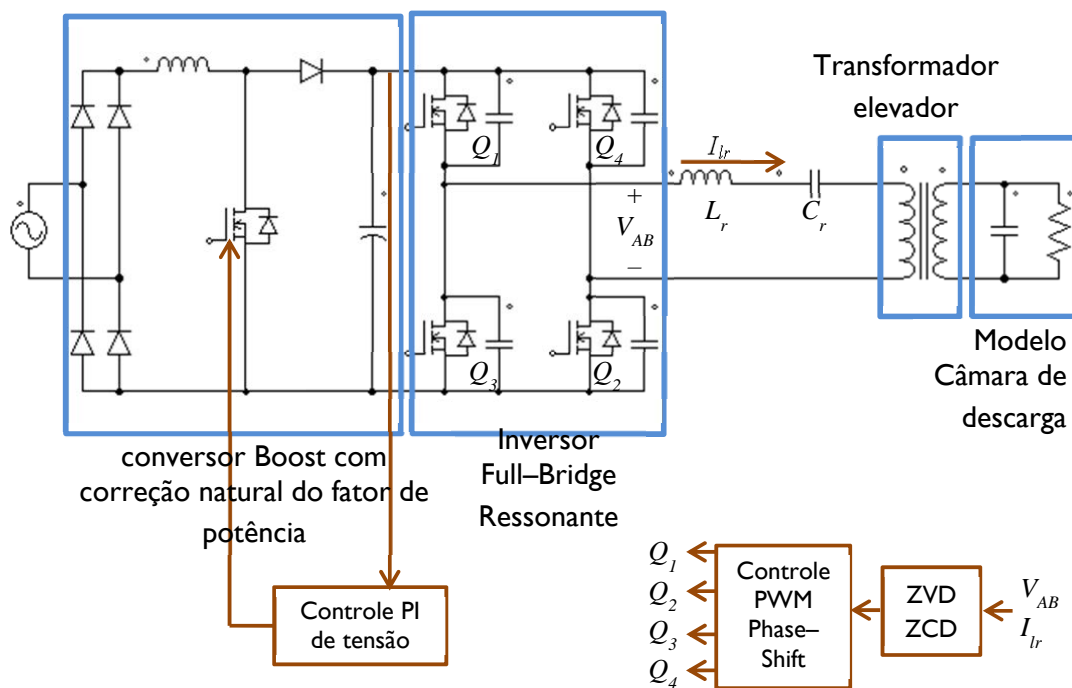
Com o método de colorimetria é possível medir a concentração de ozônio residual (em mg) na mescla gás-água por unidade de volume de forma aproximada. Assim, considerando o fluxo por unidade de tempo é possível estimar as gramas de ozônio produzidas por unidade de tempo.

---

### 3 PROPOSTA DE CONVERSOR PARA PRODUÇÃO DE OZÔNIO

As características elétricas obtidas nos testes com o equipamento comercial servem como ponto de partida para o projeto do conversor proposto neste trabalho. A partir da potência ativa total medida do arranjo de conversores (comercial) junto com a eficiência elétrica mínima estimada de 0,7 do conjunto proposto, admitida como um valor conservador, estima-se também uma potência elétrica de saída aproximada para o conversor proposto de 200W nas câmaras de descarga. Assim, de acordo com os capítulos anteriores, neste capítulo apresenta-se e analisa-se uma estrutura geradora de pulsos de alta tensão em substituição à versão comercial apresentada, incluindo-se as especificações dos componentes e simulações. O conversor proposto é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Estrutura proposta para a geração de ozônio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura proposta é composta de três partes principais e dois estágios: no primeiro estágio a obtenção de um barramento CC a partir da utilização do retificador Boost com correção natural do fator de Potência, em modo de condução descontínua (MCD), como seguidor de tensão e com malha de controle da tensão de saída; no segundo estágio, temos a

utilização de uma ponte inversora Full-bridge com controle por deslocamento de fase (*phase-shift*) e frequência constante com modulação de pulsos bipolares, seguido de um circuito ressonante composto por  $L_r$ ,  $C_r$  e transformador elevador de pulsos de alta tensão e alta frequência, operando em torno de 10kHz, para a obtenção de pulsos de até 6kV (parâmetros suficientes para a geração de ozônio). Circuitos de detecção de cruzamento por zero da tensão ressonante podem ser utilizados para sincronizar o chaveamento dos transistores do inversor na sua operação ressonante.

Na estrutura proposta a indutância de dispersão do transformador elevador de pulsos de alta frequência é utilizada para realizar a quase-ressonância série, considerando-a associada à indutância  $L_r$  incluída no circuito primário do transformador, assim como, com a inclusão de uma capacitância  $C_r$  série, ajusta-se a frequência de ressonância, e assim, a frequência de operação (frequência de comutação das chaves).

Desta forma, o estágio inversor funciona de forma ressonante devido à presença das indutâncias de magnetização e dispersão, indutância e capacitância série incluídas e a capacitância e resistência da câmara de descarga, constituindo um circuito RLC equivalente, como se analisará nos próximos capítulos. Assim, as formas de onda da tensão e corrente na carga apresentam formas de onda quase senoidal.

A partir dos testes feitos com o ozonizador comercial, são definidas as características elétricas mínimas para o conversor proposto, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação: Ozonizador Comercial e Proposta

		Ozonizador comercial	Proposta
$P_{in}$	Potência ativa de entrada [W].	128	200
$FP_{in}$	Fator de Potência de entrada.	0,61	>0,95
$S_{in}$	Potência Aparente de entrada (VA)	208	<210
$V_{in\ rms}$	Tensão eficaz de entrada [Vrms].	220	220

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, conforme se observa na Tabela 5, a potência aparente de entrada será praticamente a mesma. Entretanto, a energia reativa na entrada será muito reduzida, disponibilizando-se maior energia ativa para a carga. Observa-se ainda que o conjunto de pulsadores presentes no equipamento comercial analisado (14, quatorze unidades), serão todos substituídos por um único conversor proposto, considerando-se que todas as câmaras de descarga serão associadas em paralelo. Tal proposta visa ainda, como comentado anteriormente, uniformizar a produção de ozônio em cada uma das 14 câmaras.

Resumindo, a estrutura proposta contém os seguintes componentes:

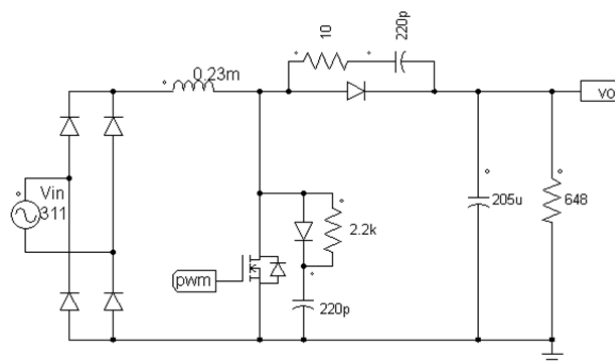
- Único pulsador para todas as 14 câmaras: todas as câmaras em paralelo submetidas ao mesmo potencial elétrico, obtendo estabilidade e eficiência na produção de  $O_3$ ;
- Pulsos bipolares e de elevada tensão (em torno de 6kV) em alta frequência (em torno de 10kHz), no conjunto de câmaras;
- Conversor de entrada com Correção do Fator de Potência (CFP), para melhorar a eficiência energética e atendimento de normas internacionais (maior FP e menor DHT);
- Conversor Full-bridge ressonante phase-shift, operando em 10kHz, propiciando comutações não dissipativas (ZVS / ZCS) e menores perdas, maior eficiência.

### 3.1. Estágio de entrada com correção do fator de potência

O estágio de entrada consiste na obtenção de um barramento CC a partir da utilização do conversor Boost com correção natural ativa do fator de Potência, em modo de condução descontínua (MCD), atuando como seguidor de tensão e com malha de controle da tensão de saída do barramento CC.

Na sequência são mostrados os cálculos do projeto desenvolvido, o circuito básico simulado e construído. A Figura 14 mostra o retificador Boost empregado para a obtenção do barramento CC.

Figura 14 – Conversor Retificador Boost, estágio de entrada.



Fonte: Própria do autor. PSIM.

Definem-se a tensão de entrada (valores eficazes) e a tensão de saída desejada (valores médios), conforme (10) e (12), respectivamente.

$$V_{in\ rms} = 220V_{RMS} (60Hz) \quad (10)$$

$$V_{in\ pico} = 220V_{RMS} \times \sqrt{2} = 311,13V \quad (11)$$

$$V_{out} = 360V \quad (12)$$

A variação desejada para a tensão de saída é estabelecida em (13).

$$\text{var}_{V_{out}} = \frac{V_{in\ pico} - V_{out}}{V_{out}} \leq 5\% \quad (13)$$

Quanto maior a tensão de saída neste conversor, melhor será a correção natural do fator de Potência, ou seja, a corrente de entrada melhor seguirá o formato senoidal da tensão de entrada. Fixa-se a frequência de operação (comutação) ou chaveamento do estágio de entrada conforme (14).

$$f_s = 27\text{kHz} \rightarrow T_s = \frac{1}{f_s} = 37,04\mu\text{s} \quad (14)$$

Considerando-se o MCD para o estágio de entrada, o objetivo é encontrar o valor máximo da indutância que, para a frequência de chaveamento definida, resulte na máxima corrente média na saída do estágio boost, em um período da rede. A máxima corrente média é determinada pela potência e tensão de saída especificadas, conforme (15).

$$I_{out\ max} = \frac{P_{out\ max}}{V_{out}} \quad (15)$$

Para determinar a máxima corrente média de saída do estágio Boost é necessário determinar a corrente média em um período da rede, que por sua vez depende da corrente média em um período de chaveamento, conforme (16), resultando em (17).

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{md} d(\omega t) \quad (16)$$

$$I_{md} = \frac{1}{T} \frac{I_p \cdot t_c}{2} \quad (17)$$

A corrente de pico no indutor é definida conforme (18), para um período de comutação.

$$I_p = \frac{V_{in\ pico} \text{sen}(\omega t) \cdot t_f}{L_{in}} \quad (18)$$

Considerando-se a análise de circuitos das fases de carregamento e descarregamento da indutância Boost e, ainda, considerando o menor tempo possível de inatividade no período de chaveamento e o tempo máximo de desmagnetização no indutor, é possível estabelecer uma



relação entre os tempos de carga e descarga com a mesma corrente máxima no ponto de transição, conforme (19).

$$t_c = \frac{V_{in\ pico} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot t_f}{V_{out} - V_{in\ pico} \cdot \text{sen}(\omega t)} \quad (19)$$

Também se pode definir o tempo de carregamento em relação ao período de chaveamento, conforme (20).

$$t_f = D \cdot T_s \quad (20)$$

Define-se:

$$\alpha = \frac{V_{in\ pico}}{V_{out}} \quad (21)$$

$$D_{max} = 1 - \alpha \quad (22)$$

Quanto menor o valor de  $\alpha$  melhor será a correção natural do fator de Potência. A seguinte expressão apresenta a relação inversa entre o período e a frequência de chaveamento.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (23)$$

Substituindo as relações anteriores no cálculo da corrente média para um período de chaveamento, obtém-se (24).

$$I_{md} = \frac{V_{in\ pico} \cdot D^2 \cdot \alpha \cdot \text{sen}(\omega t)^2}{2 \cdot f_s \cdot L_{in} \cdot (1 - \alpha \cdot \text{sen}(\omega t))} \quad (24)$$

Substituindo (24) no cálculo da corrente média, em um período da rede, tem-se:

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{md} d(\omega t) = \frac{V_{in\ pico} \cdot D^2}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} Y_1(\alpha) \quad (25)$$

Com:

$$Y_1(\alpha) = -2 - \frac{\pi}{\alpha} + \frac{2}{\alpha \cdot \sqrt{1 - \alpha^2}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left( \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \right) \right] \quad (26)$$

Igualando-se (25) com a máxima desejada na saída do Boost, obtém-se (27).

$$I_o = \frac{V_{in\ pico} \cdot D^2}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} Y_1(\alpha) = \frac{P_{outmax}}{V_{out}} \quad (27)$$

Assim, encontra-se a máxima indutância que garantirá uma corrente máxima na saída do retificador Boost, a partir da corrente média máxima, para garantir no limite a condução crítica, no ponto máximo da tensão de entrada, conforme (28). Resultando, com os dados de especificação, no valor apresentado em (29).

$$L_{inmax} = \frac{V_{in\ pico}^2 \cdot D^2}{2\pi \cdot f_s \cdot P_{outmax} \cdot \alpha} Y_1(\alpha) \quad (28)$$

$$L_{inmax} = 0,39mH \quad (29)$$

Escolhe-se na prática uma indutância menor a tal valor que garante, no pior caso, a condução crítica no pico da senoide da tensão de entrada, tal que o modo de condução descontínua seja assegurado. Uma indutância de 0,23mH foi adotada.

Em (30) tem-se o cálculo da largura do pulso ( $t_f$ ) para a condição de operação nominal.

$$t_f = \left(1 - \frac{V_p}{V_o}\right) \cdot \frac{1}{f_s} = 5,03\mu s \quad (30)$$

Em (31) tem-se o cálculo da resistência equivalente de carga, para os testes do estágio de entrada.

$$R_{out} = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} = 648\Omega \quad (31)$$

A Tabela 6 mostra o resumo dos cálculos realizados para o projeto e operação em malha aberta do retificador Boost proposto.

Tabela 6 – Parâmetros de operação do conversor retificador Boost

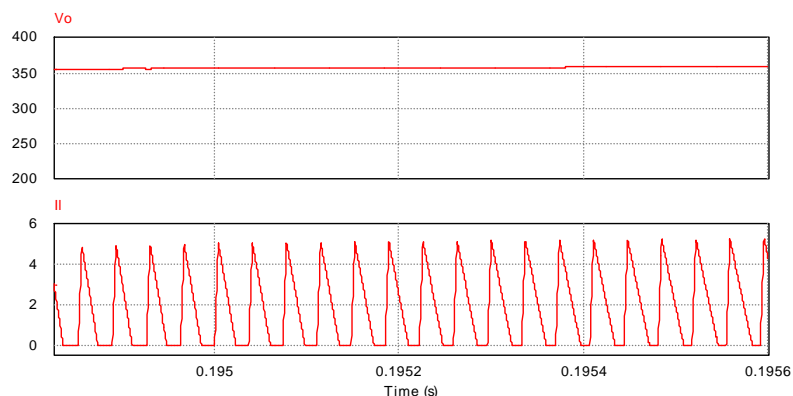
<b>Parâmetros de operação conversor Boost</b>		
		<b>Equação</b>
<b>Tensão de linha [V] RMS:</b>	220	(10)
<b>Tensão de linha [V] pico:</b>	311,13	(11)
<b>Frequência da rede [Hz]:</b>	60	
<b>ESTÁGIO 1. BOOST (MCD)</b>		
<b>Tensão desejada barramento CC [V]:</b>	360	
<b>Frequência de chaveamento [kHz]:</b>	27	(14)
<b>Período de chaveamento [<math>\mu</math>s]:</b>	37,04	(14)
<b>Potência adotada de saída total barramento CC [W]:</b>	200	
<b>Corrente na carga [A]:</b>	0,55	(15)
<b>Carga equivalente de saída Boost <math>R_o</math> [ohms]:</b>	648	(31)
<b>Tensões de entrada [V]pico:</b>	311,13	
<b>Ganho estático alfa (<math>v_p/v_o</math>):</b>	0,86	(21)
<b>Razão cíclica max, limite condução crítica:</b>	0,14	(22)
<b>Largura do pulso pwm, nominal e crítica [<math>\mu</math>s]:</b>	5,03	(30)
<b>Indutor máximo para limitar condução crítica [mH]:</b>	0,39	(28)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.1. Simulação em malha aberta

A partir do ponto de operação resumido na anterior Tabela 6 foi simulado o circuito apresentado na Figura 14. Na sequência, na Figura 15, apresenta-se a tensão de saída do barramento CC e a corrente em condução descontínua no indutor Boost.

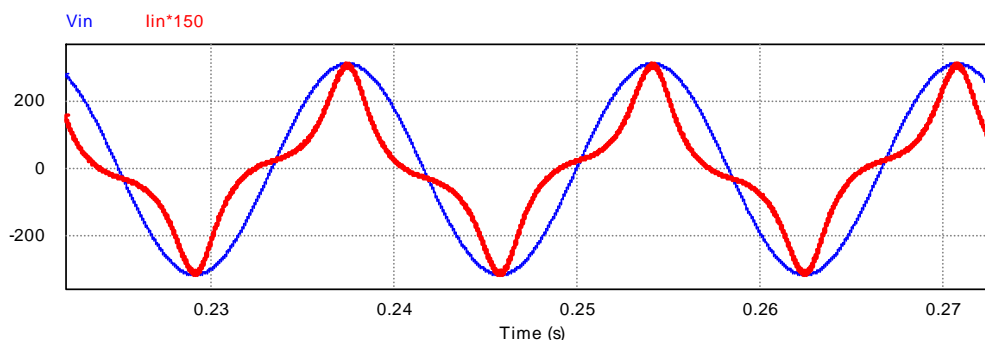
Figura 15 – Tensão de saída do Boost e corrente no indutor Boost, no ponto de máxima tensão de entrada.



Fonte: Própria do autor. PSIM.

A Figura 16 mostra a distorção da corrente de entrada em relação à forma de onda da tensão de entrada. A distorção harmônica total (DHT) da corrente de entrada para uma frequência base de 60Hz é aproximadamente 39%, para os resultados de simulação.

Figura 16 – Tensão e corrente de entrada do retificador Boost.



Fonte: Própria do autor. PSIM.

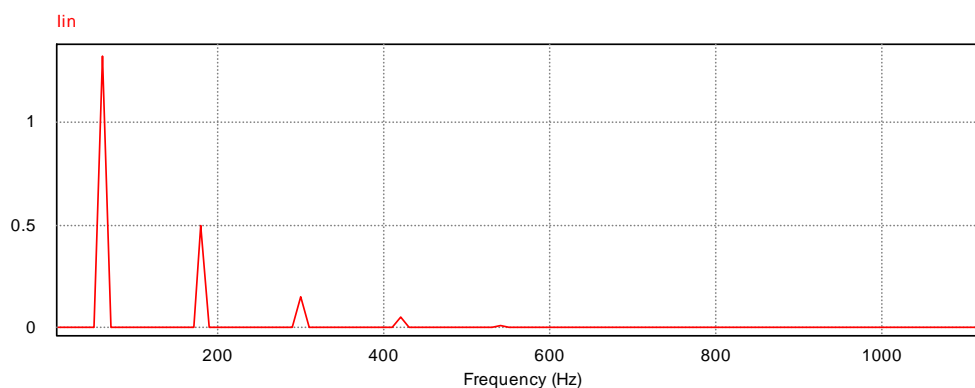
A distorção harmônica total foi calculada pelo simulador PSIM. Assim, para a determinação do fator de potência, como a defasagem entre a tensão e a corrente de entrada é mínima, o fator de distorção é praticamente igual ao fator de potência e superior a 0,93, conforme (32) e (33).

$$FD = \frac{1}{\sqrt{1 + DHT^2}} \quad (32)$$

$$FP \approx FD = \frac{1}{\sqrt{1 + (0,39)^2}} = 0,93 \quad (33)$$

O conteúdo harmônico da corrente de entrada do conversor boost é mostrado na Figura 17. Observa-se que a principal componente harmônica, excetuando a fundamental, é a componente de terceira ordem, principal responsável pela distorção da corrente de entrada. Observa-se que, elevando-se a tensão do barramento CC, pode-se reduzir em muito esta principal componente harmônica. Contudo, resultando em maiores esforços de tensão nos semicondutores.

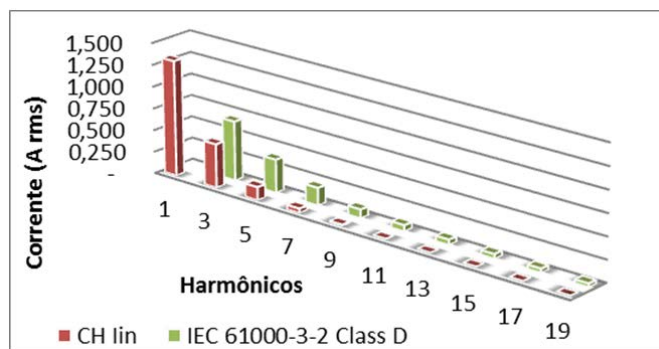
Figura 17 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada.



Fonte: Própria do autor. PSIM.

Na operação com carga constante, o conversor boost de entrada atende satisfatoriamente o seu objetivo e atende os limites estabelecidos por normas internacionais para a distorção harmônica total, admitindo-se a norma IEC 61000 para equipamentos classe D. Na Figura 18 apresenta-se uma comparação gráfica entre o conteúdo harmônico da corrente de entrada e os limites da norma IEC 61000-3-2, classe D.

Figura 18 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada vs. norma IEC 61000-3-2 classe D



Fonte: Própria do autor.

Na Tabela 7 tais conteúdos obtidos são comparados com a norma correspondente.

Tabela 7 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada vs. norma IEC 61000–3–2 classe D

Harmônico No.	Frequência (Hz)	Componente de Fourier (A pico)	IEC CLASSE D
1	60	1,320	
3	180	0,500	0,680
5	300	0,150	0,380
7	420	0,050	0,200
9	540	0,015	0,100
11	660	0,005	0,070
13	780	0,002	0,059
15	900	0,002	0,051
17	1020	0,001	0,045
19	1140	0,001	0,041

Fonte: Própria do autor.

### *3.1.2. Projeto físico de componentes*

#### *Transistor conversor Boost*

De acordo com a operação proposta do circuito Boost é preciso escolher a chave de acordo com as exigências da operação, a tensão máxima de bloqueio a suportar é maior do que a tensão de saída no barramento CC, considerando também as oscilações devido aos efeitos parasitas e indutivos. A corrente de pico será a mesma corrente de pico no indutor, a qual depende do tempo de condução, da indutância e da tensão. Na sequência na Tabela 8 apresenta-se um resumo dos esforços principais de tensão e corrente para a escolha do componente.

Tabela 8 – Esforços na chave do conversor Boost

PARÂMETROS DE OPERAÇÃO CHAVE BOOST	
Tensão de entrada [V]pico:	311,13
Tensão máxima de bloqueio [V]:	369
Corrente de pico na chave [A]:	4,2
Corrente média na chave [A]:	0.28
Frequência de chaveamento [kHz]:	27

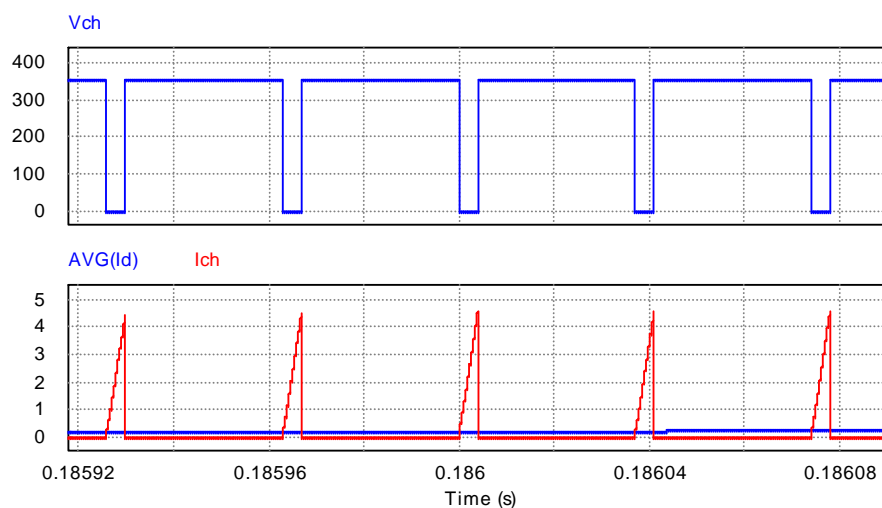
Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante esclarecer que em uma posterior ação de controle, a tensão nas chaves pode incrementar superando os limites mostrados na tabela anterior. Assim, no projeto do controlador e na escolha dos componentes admitem-se valores até 20% maiores aos mostrados na Tabela 8.

A partir destes dados, definiu-se pela utilização do transistor IRFPS43N50K. No Apêndice B são mostradas as características elétricas dos componentes empregados.

A Figura 19 mostra a tensão, corrente e corrente média obtidas na simulação, no ponto de operação com carga nominal e malha aberta, em um ponto em torno de um quarto da senoide da tensão de entrada, demonstrando a operação descontínua da corrente.

Figura 19 – Tensão, corrente e corrente média na chave do conversor Boost.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

### **Diodo Boost**

A tensão máxima de bloqueio no diodo Boost corresponde à tensão de saída do retificador Boost, a corrente depende da carga e descarga do capacitor de saída que a sua vez depende da potência de saída do barramento CC. A Tabela 9 mostra um resumo dos principais esforços para a escolha do diodo.

Tabela 9 – Esforços obtidos em simulação: Diodo do conversor Boost

PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DIODO BOOST	
Tensão máxima de bloqueio [V]:	369
Corrente de pico diodo Boost [A]:	4,2
Corrente média no diodo Boost [A]:	1,7
Frequência de chaveamento [kHz]:	27

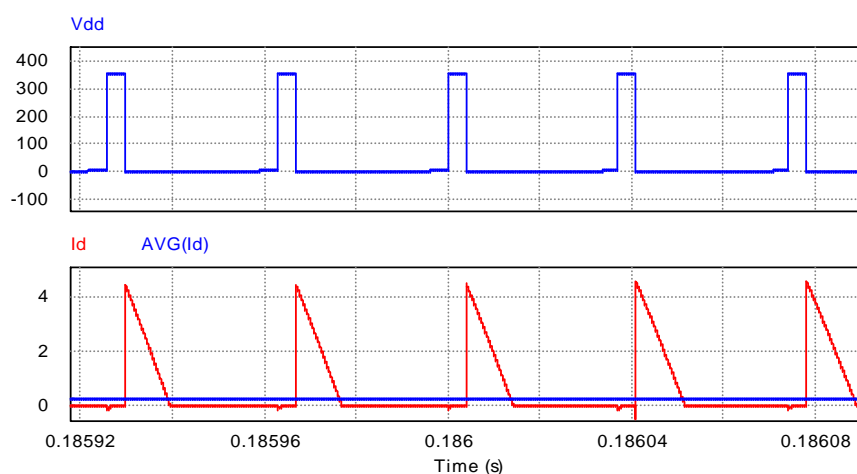
Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente média no diodo Boost é menor que a corrente média na chave, basicamente por que a tensão de saída do conversor é maior que a tensão de entrada, mantendo a potência constante.

A partir destes dados, especificou-se o diodo MUR460 para esta aplicação. Diodos tipo *Ultra-Fast Recovery* são os desejáveis para este diodo.

A Figura 20 mostra a tensão, corrente e corrente média no diodo de saída obtidas na simulação do ponto de operação com carga nominal e malha aberta, no início da tensão senoidal de entrada.

Figura 20 – Tensão, corrente e corrente média no diodo Boost.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

### **Diodos retificadores de entrada**

A tensão máxima de bloqueio dos diodos é a tensão pico da tensão de entrada do retificador Boost. A frequência de operação é o dobro da frequência da rede. Portanto, uma simples ponte retificadora pode ser útil nesta aplicação, garantindo os níveis máximos de tensão e corrente mostrados na Tabela 10. Contudo, considerando o MCD do Boost, recomenda-se que os diodos da ponte retificadora de entrada sejam pelo menos de ação rápida (*Fast recovery*).

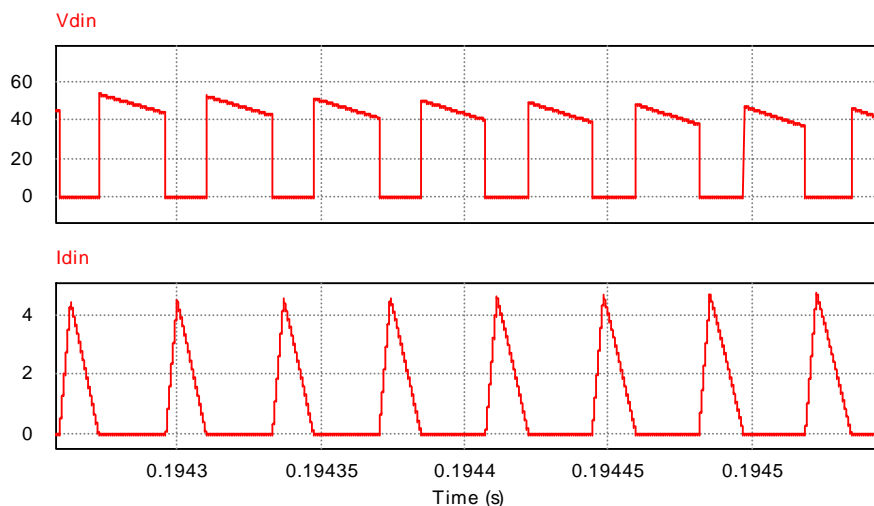
Tabela 10 – Esforços Diodos Retificadores

PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DIODO BOOST	
<b>Tensão máxima de bloqueio [V]:</b>	311,13
<b>Corrente de pico diodo retificador [A]:</b>	4,2
<b>Corrente média diodo retificador [A]:</b>	0,13
<b>Frequência de Operação [Hz]:</b>	120

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 mostra a tensão, corrente e corrente média no diodo retificador da entrada obtidas na simulação do ponto de operação com carga nominal e malha aberta, perto do ponto máximo da tensão de entrada.

Figura 21 – Tensão, corrente e corrente média em um diodo retificador de entrada.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

### **Capacitor filtro de saída**

O cálculo do capacitor do filtro da saída do conversor Boost depende principalmente da potência na carga e da oscilação de tensão de saída desejada. Quanto menor a oscilação desejada maior será a capacitância deste filtro. A tensão de saída também determinará o tamanho físico do capacitor. Na sequência apresenta-se a expressão (34) para o seu cálculo e a Tabela 11 que mostra o resumo dos parâmetros básicos para a sua escolha, para diferentes oscilações de tensão.

$$C_{dc} = \frac{P_{out_{max}}}{f_{rede} \cdot (V_{out_{max}}^2 - V_{out_{min}}^2)} \quad (34)$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Capacitor filtro saída Boost

PARÂMETROS DE OPERAÇÃO CAPACITOR SAÍDA BOOST			
<b>Oscilação tensão de saída Boost [%]:</b>	1,5	2,75	5
<b>Máxima tensão de saída Boost [V]:</b>	372,8	375,1	379,25
<b>Mínima tensão de saída Boost [V]:</b>	367,2	364,9	360,75
<b>Capacitor filtro de saída [µF]:</b>	253,5	132,8	73
<b>Frequência da oscilação na saída [Hz]:</b>	120	120	120

Fonte: Elaborado pelo autor.

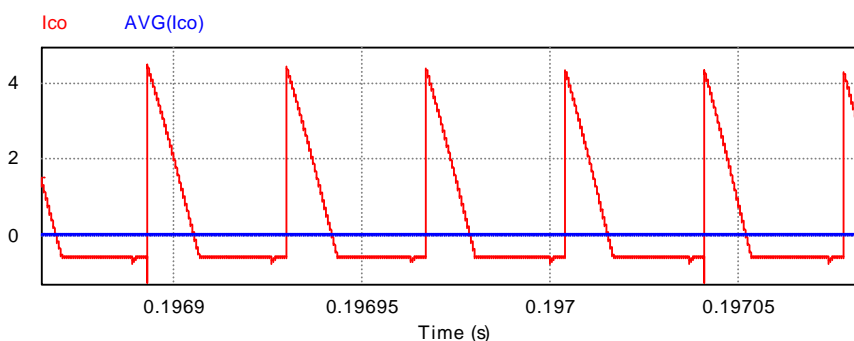


Um capacitor próximo a  $200\mu\text{F}$  garante uma oscilação menor que 5% na tensão de saída. Quanto maior for o capacitor maior será a corrente inicial de carga no momento de ligar o circuito, criando a necessidade que incluir um circuito para a limitação desta corrente inicial de inrush.

No projeto físico a corrente inicial de inrush é limitada com a inclusão de um termistor, na saída da ponte retificadora de entrada e em série (antes) com o indutor boost. Portanto, um capacitor eletrolítico de  $200\mu\text{F}$  @ 450V foi empregado.

A Figura 22 mostra a tensão, corrente e corrente média no capacitor de saída, obtidas na simulação do ponto de operação com carga nominal e malha aberta.

Figura 22 – Corrente e corrente média no capacitor de saída.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

### **Indutor Boost**

Na primeira parte deste capítulo foi calculada a indutância do indutor para garantir a condução descontínua, foi também calculada e fixada a razão cíclica de operação e foi calculada a corrente de pico no indutor boost, dados que garantem a condução descontínua durante a operação.

A tensão de pico positivo no indutor é igual ao valor de pico da tensão de entrada retificada da rede e o valor máximo negativo corresponde ao valor da tensão de saída, conforme se observa na Figura 23 e dados da Tabela 12.

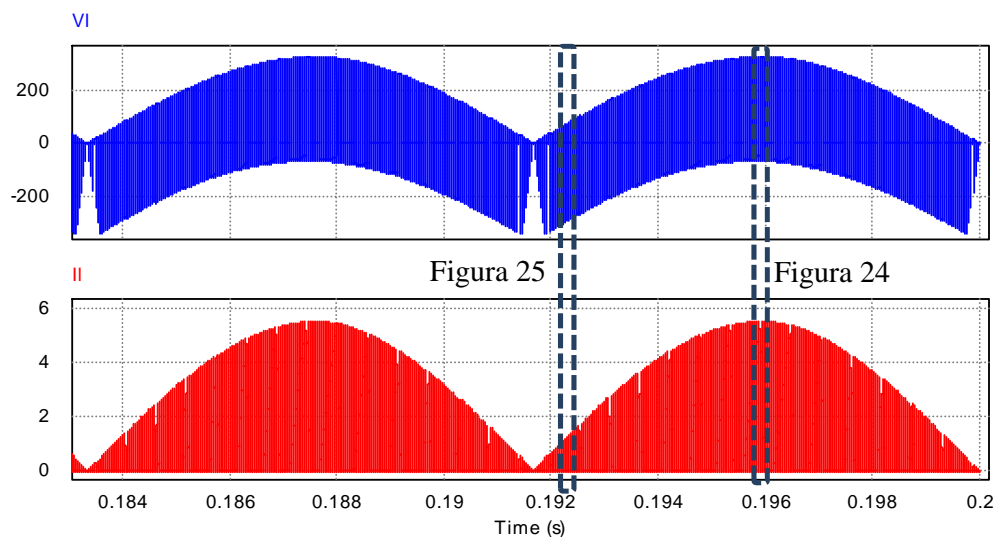
Tabela 12 – Esforços Indutor Boost  
PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DIODO BOOST

<b>Tensão máxima indutor Boost [V]:</b>	311,127
<b>Tensão mínima indutor Boost [V]:</b>	-360
<b>Amplitude da Tensão diferença no indutor [V]:</b>	360
<b>Corrente de pico indutor Boost [A]:</b>	4,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 23 mostra a tensão e corrente no indutor Boost obtidas na simulação do ponto de operação com carga nominal e malha aberta. A corrente média no indutor é igual à soma das correntes médias na chave e diodo Boost, sendo seu valor a corrente média de entrada do conversor Boost.

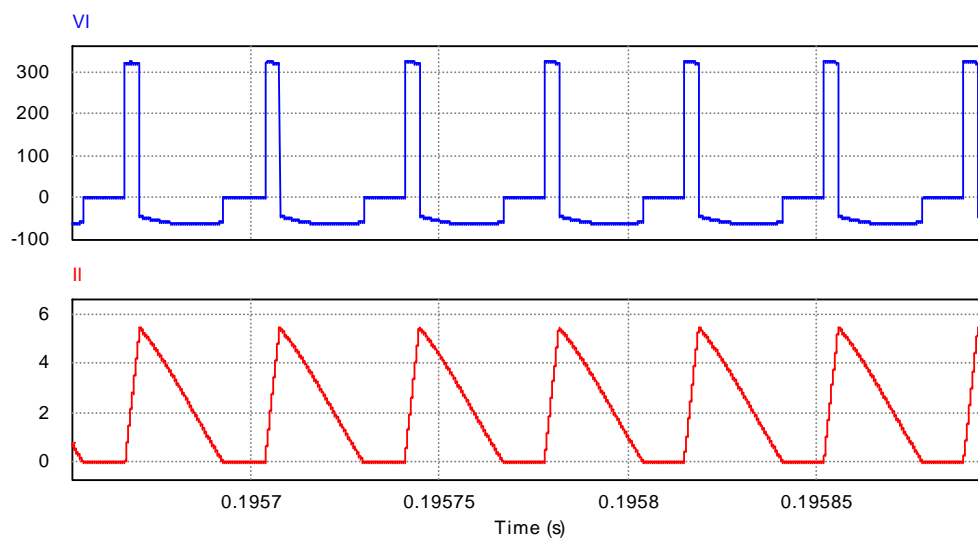
Figura 23 – Tensão e corrente no indutor Boost.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

A Figura 24 detalha as diferenças de tensões no indutor boost para cada etapa da condução descontínua em torno do ponto máximo da tensão de entrada.

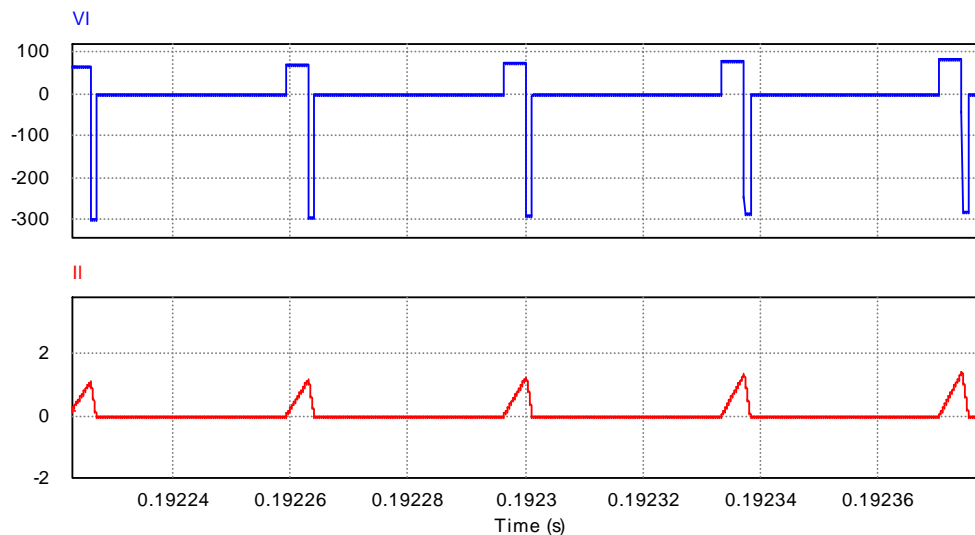
Figura 24 – Tensão e corrente no indutor Boost, detalhe da operação.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

A Figura 25 detalha as diferenças de tensões no indutor boost para cada etapa da condução descontínua em torno do ponto de tensão de entrada nula.

Figura 25 – Tensão e corrente no indutor Boost, detalhamento da operação.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Com estes dados (corrente de pico pelo indutor, limites para a razão cíclica) e conhecendo a indutância máxima que garanta a condução crítica pode-se continuar com o projeto físico do indutor. Começando pela seleção do mínimo tamanho para o núcleo do indutor, conforme (35), admite-se o uso de núcleo de Ferrite tipo EE (dados conforme link <http://www.thornton.com.br/pdf/CATÁLOGO%20THORNTON.pdf>).

A expressão ( 35 ) fornece o produto entre a área livre da janela ( $A_j$ ) do núcleo vezes a área transversal da perna do núcleo ( $A_p$ ), este dado serve de orientação para a escolha inicial do tamanho e dimensões do núcleo, onde o  $P_{inc}$  corresponde à potência a transferir pelo conversor, a constante  $K_p$  representa o fator de utilização, adotando-se um valor de 1 para este conversor, a constante  $K_w$  representa o fator de utilização da janela do enrolamento adotando-se um valor 0,7 para este caso, sendo que a densidade de corrente  $J_L$  é adotada para este projeto em  $450A/cm^2$ , a densidade de fluxo magnético  $B$  adotada para o núcleo será de 0,3T, inferior ao valor de saturação e impedindo elevação de temperatura por perdas em saturação, e  $f_s$  corresponde à frequência de chaveamento.

$$A_j A_p = \frac{P_{inc} \cdot 10^4}{K_p K_w J_L B f_s} [cm^4] \quad (35)$$

A partir destes dados pode-se escolher um tamanho de núcleo adequado para a operação, sendo que o núcleo NEE 30/15/7 apresenta o melhor ajuste em volume e ocupação dos enrolamentos, de acordo com a Tabela 13.

Para reduzir a possibilidade de saturação do núcleo é projetado a inclusão de entreferro a partir de (36), onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do ar ( $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ),  $I_p$  a corrente de pico fluindo pelo indutor em ampères,  $L_{in}$  a indutância do indutor boost em  $H$  e  $A_p$  a área transversal do braço do núcleo em  $m^2$ .

$$L_g[cm] = \frac{\mu_0 \cdot I_p^2 \cdot L_{in}}{2 B^2 A_p} * 100 \quad (36)$$

O cálculo do número de espiras é feito a partir de (37), onde a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) é definida em *Gauss* ( $1 \text{ Gauss} = 1 \text{ Tesla} * 10^4$ ).

$$N_{esp} = \frac{B_{[gauss]} \cdot L_g[cm]}{0,4 \pi I_p} \quad (37)$$

A bitola mínima (em *Circular Mills*) do condutor do enrolamento é definida a partir de (38), após isso o valor é comparado com tabelas de fabricantes para escolher um condutor com bitola real acima da bitola mínima calculada.

$$A_{Bitola}[CM] = J_L [A/cm^2] \cdot I_p \quad (38)$$

Assim, a área aproximada ocupada pelo enrolamento na janela é definida pela bitola do condutor vezes o número de espiras e incrementado por um fator de ocupação  $K_w$ , conforme (39).

$$A_{oc}[mm^2] = \left( \frac{A_{Bitola \text{ AWG}}[CM]}{K_w} \right) \cdot (\pi * (0,001 * 25,4/2)^2) \cdot N_{esp} \quad (39)$$

O comprimento do condutor pode-se definir a partir do número de espiras vezes o perímetro médio do braço central do núcleo utilizado, conforme (40).

$$L_{Comp}[m] = N_{esp} \cdot P_u [mm]/1000 \quad (40)$$

Na sequência, na Tabela 13, apresentam-se os dados obtidos para o projeto e para a construção do indutor Boost, escolhendo-se o núcleo NEE 30/15/7.

Tabela 13 – Projeto indutor Boost

Projeto indutor Boost	Equação	
Densidade de fluxo magnético [T] (adotado para o material):	0,3	Adotado
Densidade de fluxo magnético [Gauss]:	3000	
Densidade de Corrente [A/cm <sup>2</sup> ] (adotado):	450	Adotado
Densidade de Corrente [A/mm <sup>2</sup> ]:	4,5	
Densidade de Corrente [CirMill/A]:	438,56	
Produto AjAp [mm <sup>4</sup> ]:	4515	( 35 )
<u>núcleo NEE 30/15/7</u>		
Perímetro braço central [mm]:	56	Fabricante
Área do braço central do núcleo [mm <sup>2</sup> ]:	60	Fabricante
Área da janela real [mm <sup>2</sup> ]:	80	Fabricante
Área da janela a partir de AjAp [mm <sup>2</sup> ]:	75,25	( 35 )
Entreferro [mm]:	0,44	( 36 )
Número de espiras:	49	( 37 )
Corrente eficaz no indutor Boost [A]:	1,36	( 17 )
Bitola fios indutor Boost [CM]:	596,34	( 38 )
Bitola condutor comercial [CM]:	643	Fabricante
Tipo condutor comercial [awg#]:	22	Fabricante
Área ocupada da janela [mm <sup>2</sup> ]:	24,9	( 39 )
Comprimento total aproximado [m]:	2,6	( 40 )

Fonte: Elaborado pelo autor.

### **Filtro entrada**

Na entrada é preciso a inclusão de um filtro de linha para atenuar o conteúdo da frequência de chaveamento na corrente de entrada, mas não interferir na frequência da rede para a correta operação da retificação. Propõe-se assim um filtro  $L_f C_f$  a ser inserido na entrada (lado CA) do retificador Boost. Escolhe-se uma frequência de corte uma década abaixo da frequência de chaveamento, conforme (41).

$$f_c = \frac{f_s}{10} = 2,7\text{kHz} \rightarrow \omega_c = 2\pi f_c = 16964 \text{ rad/s} \quad (41)$$

A corrente de pico no indutor do filtro de entrada é a mesma corrente de pico no indutor Boost (incluída na Tabela 12), com esta corrente de pico calcula-se uma resistência equivalente para o projeto do filtro, conforme (42).

$$R_{eq\ in} = \frac{v_{in\ pico}}{I_p} = \frac{311,13\text{V}}{4,2\text{A}} = 77\Omega \quad (42)$$

Após isso calcula-se a capacitância do capacitor do filtro a partir da expressão (43).

$$C_f = \frac{1}{R_{eq\ in} 2 \omega_c} = 0,38\mu F \quad (43)$$

É adotada uma capacitância de  $1,33\mu F$ , comercialmente disponível com um arranjo em paralelo de capacitores de poliéster de  $1\mu F$  e  $0,33\mu F @ 1000V_{pp}$  CA, adequados para a aplicação.

A indutância  $L_f$  do indutor do filtro de entrada pode ser calculada a partir da expressão (44), considerando o valor adotado para  $C_f$  e garantido a frequência de corte.

$$L_f = \frac{1}{C_f (\omega_c)^2} = 2,57mH \quad (44)$$

Conhecendo também a corrente eficaz de entrada a partir da tensão e Potência de entrada, a corrente de pico de entrada, conhecendo as características magnéticas do núcleo e estabelecendo a densidade de corrente desejada no indutor é possível projetar o indutor do filtro de maneira similar ao procedimento do indutor Boost. Os resultados, incluindo número de espiras, tipo de núcleo, área ocupada da janela, bitola do condutor e comprimento total são resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 – Projeto indutor Filtro de entrada

INDUTOR FILTRO DE ENTRADA	
Densidade de fluxo magnético [T]:	0,3
Densidade de fluxo magnético [Gauss]:	3000
Densidade de Corrente [A/mm <sup>2</sup> ]:	4,5
Densidade de Corrente [CirMill/A]:	438,56
Produto AjAp [mm <sup>4</sup> ]:	8230,45
<u>núcleo NEE 30/15/7</u>	
Perímetro braço central [mm]:	56
Área braço central do núcleo [mm <sup>2</sup> ]:	60
Área da janela real [mm <sup>2</sup> ]:	80
Área da janela a partir de AjAp [mm <sup>2</sup> ]:	137,17
Entreferro [mm]:	1,1
Número de espiras:	38
Corrente eficaz no indutor [A]:	1,65
Bitola fios indutor [CM]:	725
Bitola condutor comercial [CM]:	810
Tipo condutor comercial [awg#]:	21
Área ocupada da janela [mm <sup>2</sup> ]:	25,9
Comprimento total [m]:	2,11

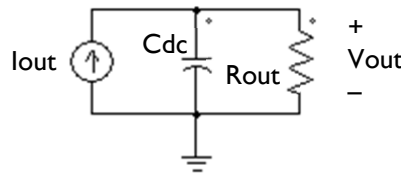
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3. Controle conversor Boost – malha de tensão

O primeiro passo no projeto do controle em malha fechada de tensão do conversor Boost proposto é o conhecimento e modelagem do conversor para obter sua função de transferência.

O circuito equivalente simplificado do conversor e mostrado na Figura 26, representado como uma fonte de corrente em paralelo com o filtro capacitivo de saída e a carga na saída. Desta forma, com regras básicas de circuitos elétricos determina-se a relação entre a entrada e saída do circuito. O modelo é determinado considerando-se corrente média nula no capacitor e potência na carga constante.

Figura 26 – Circuito equivalente de saída do conversor Boost



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Assim, consideram-se as expressões (45) e (46).

$$I_{out} = \frac{V_{out}(s)}{\frac{1}{S C_{dc}}} + \frac{V_{out}(s)}{R_{out}} \quad (45)$$

$$I_{out} = \left( \frac{1 + S C_{dc} R_{out}}{R_{out}} \right) V_{out}(s) \quad (46)$$

Contudo, é preciso determinar a função de transferência entre a variável de controle (a razão cíclica  $D$ , neste caso) e a variável controlada (neste caso a tensão de saída  $V_{out}$ ).

Partindo da expressão (27) da corrente média no indutor Boost, reapresentada na sequência em (47) é possível escrever de forma definitiva a função de transferência do circuito relacionando a tensão ( $V_{out}$ ) de saída com a razão cíclica  $D$ , que é a variável de controle. Manipulando-se (47), considerando-se (50) tem-se o seguinte procedimento:

$$I_{out} = \frac{V_{in \text{ pico}} \cdot D^2}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} Y_1(\alpha) = \frac{P_{out \max}}{V_{out}} \quad (47)$$

$$\frac{V_{in \text{ pico}} V_{out} \cdot D^2}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} Y_1(\alpha) = R_{out} (I_{omax})^2 \quad (48)$$

$$I_{omax} = D \sqrt{\frac{V_{in\ pico} V_{out}}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in} \cdot R_{out}}} Y_1(\alpha) \quad (49)$$

$$\alpha = \frac{V_{in\ pico}}{V_{out}} \rightarrow V_{out} = \frac{V_{in\ pico}}{\alpha} \quad (50)$$

Substituindo ( 50 ) na expressão ( 49 ) tem-se:

$$I_{omax} = D \cdot V_{in\ pico} \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in} \cdot R_{out}} \frac{Y_1(\alpha)}{\alpha}} \quad (51)$$

Substituindo ( 51 ) na expressão ( 46 ) tem-se (52) e finalmente (53), função de transferência para o conversor Boost.

$$D(s) \cdot V_{in\ pico} \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in} \cdot R_{out}} \frac{Y_1(\alpha)}{\alpha}} = \left( \frac{1 + S C_{dc} R_{out}}{R_{out}} \right) V_{out}(s) \quad (52)$$

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{D(s)} = V_{in\ pico} \sqrt{\frac{R_{out}}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} \frac{Y_1(\alpha)}{\alpha}} \left( \frac{1}{1 + S C_{dc} R_{out}} \right) \quad (53)$$

Com os dados do projeto tem-se a seguinte função de transferência para o conversor (54).

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{D(s)} = \frac{3448}{0,1328 S + 1} \quad (54)$$

### **Projeto compensador**

Para que a saída seja estável tem-se que garantir um margem de fase maior que 45 graus na frequência de cruzamento e com uma derivada de  $-20\text{dB/dec}$  do ganho, garantindo ainda erro nulo para o degrau, ou seja, um polo na origem. Para que a malha de tensão não interfira com a frequência da oscilação da tensão de saída, a frequência de cruzamento deve estar entre 10 e 20Hz.

Deve-se então ter as seguintes características:

- Polo na origem (1/s).
- Um zero coincidente com o polo do conversor, conforme (55).

$$f_{zc} = f_p = \frac{1}{2\pi C_{dc} R_{out}} = 1,2\text{Hz} = 7,53\text{rad/s} \quad (55)$$

- Frequência de cruzamento  $f_c=20\text{Hz}$ . Ganho em malha aberta do conversor para frequência de cruzamento do compensador igual a 46,28dB:

Ganho em malha aberta do conversor para frequências elevadas, conforme (56):



$$G(0) = \frac{V_{out}(s)}{D(s)} = V_{in \text{ pico}} \sqrt{\frac{R_{out}}{2\pi \cdot f_s \cdot L_{in}} \frac{Y_1(\alpha)}{\alpha}} = 3448 \quad (56)$$

Com estas condições o compensador fica determinado conforme (57).

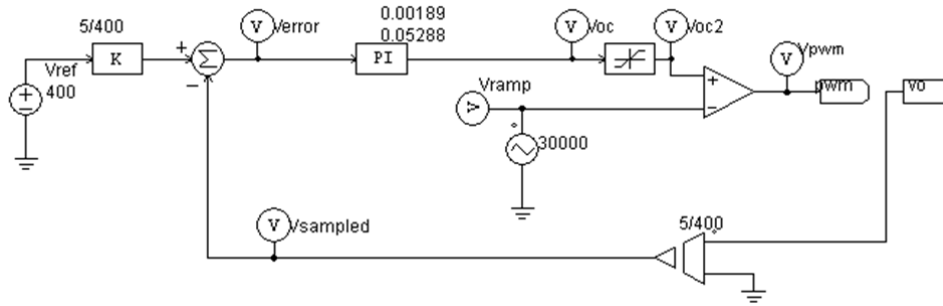
$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = 0.0048414 + \frac{0.03645}{s} \quad (57)$$

Escolhendo um compensador PI tem-se (58):

$$C(s) = \frac{G(1 + T_{ao} s)}{T_{ao} s} = \frac{0.0048414(1 + 0.1328 s)}{0.1328 s} \quad (58)$$

A Figura 27 mostra o arranjo da lógica de controle que simula o compensador projetado de maneira analógica.

Figura 27 – Malha de tensão simulada para o retificador Boost.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

No processo de digitalização do compensador e do controle é empregado o controlador digital DSC MC56F8257 da Freescale. É escolhida uma frequência de amostragem ( $f_{am}$ ) de 1kHz e o modelo de digitalização do compensador analógico conforme expressão (57), descrito em (59).

$$C(z) = K_p + K_i T_m \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{U(z)}{E(z)} \quad (59)$$

Onde:

$$T_m = \frac{1}{f_{am}} = \frac{1}{1kHz} \quad (60)$$

Isolando  $U(z)$  em termos de  $E(z)$  na expressão (59) e levando a variáveis descontinuas tem-se:

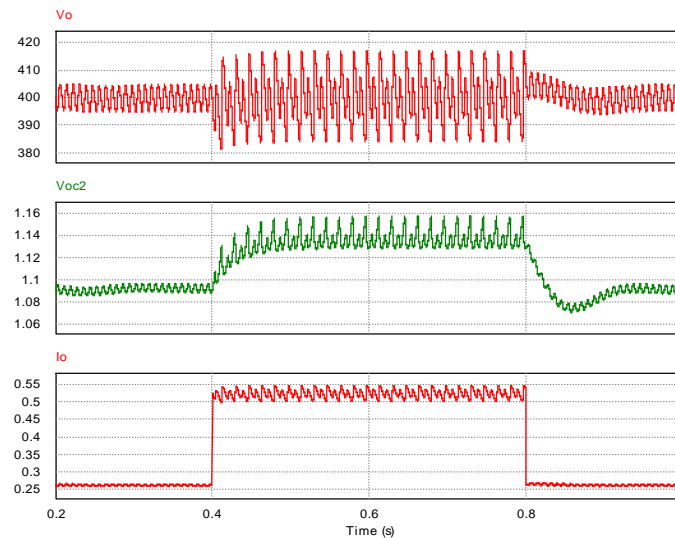
$$u_{[i]} = (K_p + K_i T_m) e_{[i]} - K_p e_{[i-1]} + u_{[i-1]} \quad (61)$$

Assim, a equação de diferenças para a implementação do controle digital projetado é mostrada na expressão (62).

$$u_{[i]} = 0,0049e_{[i]} - 0,0048e_{[i-1]} + u_{[i-1]} \quad (62)$$

Na Figura 28 mostra-se o comportamento da tensão e corrente de saída frente a um degrau de inclusão e exclusão de um incremento de 50% da carga, sendo que Voc2 corresponde ao sinal de controle.

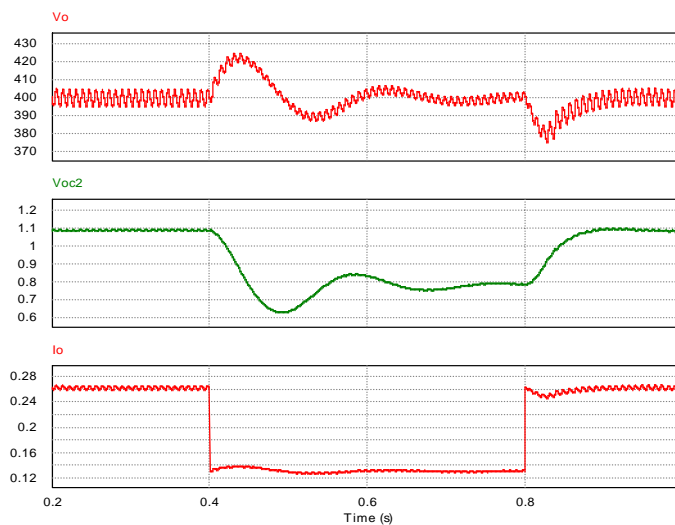
Figura 28 – Controle da tensão no barramento CC +/- 50% de carga



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

A Figura 29 mostra um caso similar ao anterior, incluindo na operação normal do conversor uma redução temporal da carga em um - 50%.

Figura 29 – Controle da tensão no barramento CC +/- 50% de carga



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

## 3.2. Estágio de saída

O estágio de saída está composto, conforme mostrado na Figura 13, pela ponte inversora Full-bridge phase-shift, o indutor e o capacitor de ajuste da frequência de ressonância, o transformador elevador e as câmaras de descarga.

### 3.2.1. Transformador Elevador

Tanto transformadores elevadores de pulsos como circuitos ressonantes são comumente utilizados para conseguir as altas tensões necessárias para a geração de ozônio, seja pelo ganho ressonante ou pela elevação eletromagnética.

Entre vários circuitos ressonantes, topologias ressonantes de carga paralela (PLR) são amplamente utilizadas em fontes de alimentação de alta tensão por causa do ganho de alta tensão próximo a frequência de ressonância. A utilização dos circuitos PLR em cascata resulta na obtenção de um ganho maior obtido como a multiplicação dos ganhos individuais, assim, a alta tensão pode ser conseguida sem a utilização de um transformador elevador, mas com o problema de se ter elevados esforços de tensão nos semicondutores do conversor.

Na sequência é analisada a opção escolhida de trabalhar com um transformador elevador de pulsos de alta frequência e alta tensão de saída. Tensões superiores a 3kV já têm a capacidade de gerar ozônio, para atingir tensões deste nível e superiores é proposta a utilização de um transformador elevador dos pulsos bipolares gerados a partir do barramento CC de 360V (neste caso).

Desta forma, uma relação de elevação igual ou pouco inferior a 1:22 é suficiente para a aplicação, podendo-se gerar pulsos de até 6kV nas câmara de descarga com tensões iguais ou menores à tensão do barramento, mantendo-se constante a potência de entrada.

Para o projeto deste transformador um fator muito importante está relacionado com a segurança devido à alta tensão no secundário, precisando de fios com isolamento adequado, considerando o número de espiras, a corrente, a possível elevação de temperatura e a tensão no secundário. Contudo, o projeto pode ser feito de forma similar ao projeto das indutâncias acopladas de uma fonte chaveada isolada elevadora, por exemplo, conhecendo-se a razão cíclica dos pulsos, a frequência de operação, a corrente de pico no primário, a tensão, a potência e as características magnéticas do núcleo.

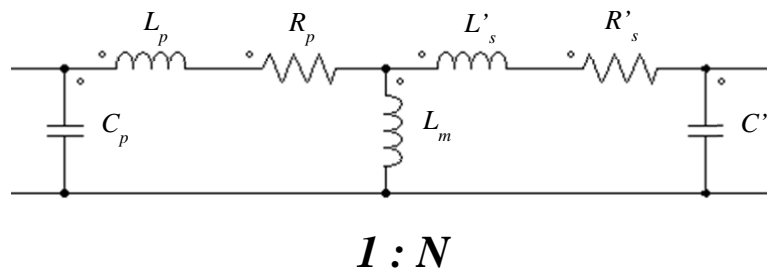
Com o objetivo de reduzir perdas por dispersão é necessário o projeto de um núcleo com alta indução magnética na frequência de operação ( em torno de 10kHz), fato que também pode reduzir o número de espiras tanto no primário e mais importante ainda no secundário, devido a questões de volume e perdas por condução dada a alta tensão de saída. Um núcleo com alta indução magnética melhora um dos principais problemas nos transformadores elevadores de pulsos de alta frequência, correspondente à dispersão a partir da baixa indução magnética e densidade de fluxo, por exemplo, como nos núcleos de Ferrite (0,3T).

O fato de ter pulsos bipolares apresenta vantagens na redução de problemas de saturação do núcleo, incrementando assim a densidade de fluxo que poderá estar mais perto da densidade de saturação do núcleo, aproveitando melhor a transferência e reduzindo igualmente o número de espiras.

A frequência em torno a 10kHz apresenta menores perdas a partir da elevação de temperatura do núcleo que um caso similar com frequência de chaveamento de 27kHz, como foi empregado no projeto do indutor Boost.

O modelo básico do transformador de alta frequência é mostrado na Figura 30, o modelo inclui capacitâncias parasitas, indutâncias de dispersão e de magnetização e resistências dos condutores, as impedâncias do secundário são referidas ao primário (Kinnares & Hothongkham, 2010) e representadas na parte direita da Figura 30.

Figura 30 – Circuito equivalente do transformador de alta frequência



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

O projeto do transformador elevador de alta frequência pode ser feito a partir da aproximação das áreas da janela e do núcleo, sendo que os seguintes dados básicos são necessários:

- Tensão de entrada: Corresponde à tensão de saída gerada pelo barramento CC convertida em pulsos bipolares de mais ou menos esta tensão. Assim, adota-se igual a  $\pm 400V$ .

- Corrente de pico no primário ( $I_p$ ): Esta corrente máxima está determinada ou determina a razão cíclica ou largura máxima dos pulsos. Estabelecendo uma corrente de pico desejada entre 30 e 40 ampères pode-se determinar esta razão cíclica.
- Frequência dos pulsos: são desejadas frequências superiores a 1kHz, o transformador é projetado para uma faixa de operação entre 1kHz e 10kHz.
- Razão cíclica correspondente para máxima  $I_p$ : Determina o tempo máximo de condução no enrolamento primário até atingir a corrente de pico escolhida sem ultrapassá-la. Podendo-se determinar a partir da seguinte expressão (63):

$$D_{max} = \frac{2 P_{out}}{\eta \cdot V_{min} \cdot I_p} = \frac{2 \cdot 200w}{0,9 \cdot 400v \cdot 10A} = 0,11 \quad (63)$$

- Duração mínima dos pulsos: Corresponde à largura dos pulsos fornecidos pelo inversor phase-shift e é determinada a partir da razão cíclica e frequência dos pulsos, conforme (64):

$$t_{pulso} = \frac{D_{max}}{f_{sp}} = \frac{0,11}{10kHz} = 11,1\mu s \quad (64)$$

- Potência ativa de saída: Como alternativa à substituição do ozonizador comercial, escolheu-se uma potência de 200W.
- Tensão saída no secundário: É desejada uma tensão menor ou igual a 6kV, mas escolheu-se 9kV para os testes iniciais de projeto.
- Indutância do primário: Pode-se determinar a partir do equacionamento básico de um indutor, conhecendo a tensão de entrada, a corrente de pico no primário e a largura máxima do pulso, conforme (65) e (66):

$$V_{min} = L_p \frac{d i(t)}{d(t)} \quad (65)$$

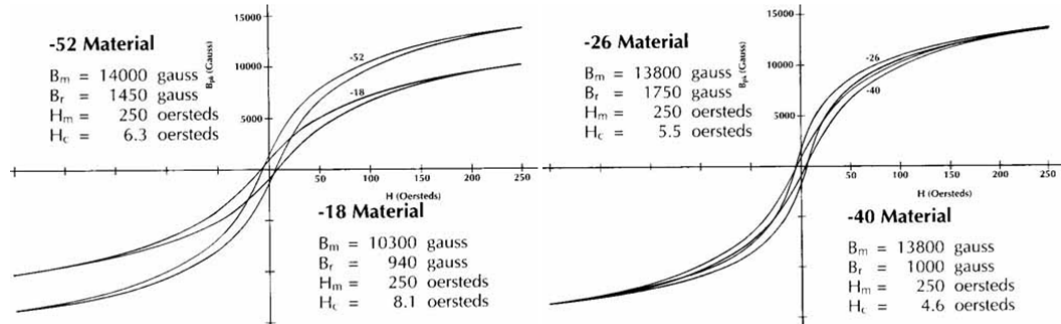
$$L_p = \frac{V_{min} t_{pulso}}{I_p t_f} = \frac{400v \cdot 11,1\mu s}{10A} = 444,44\mu H \quad (66)$$

A partir deste ponto e com as características físicas e magnéticas dos núcleos, procede-se com o projeto físico do transformador. Mostra-se o projeto físico com os principais núcleos de pó de ferro (*iron powder*) viáveis para a aplicação, desejando núcleos toroidais para reduzir as perdas por dispersão e material *iron powder* linear com elevada densidade de fluxo de saturação, para minimizar o risco de saturação.

Os materiais 26, 40 e 52 são os mais comuns para este tipo de aplicações, a partir deste ponto escolhe-se uma densidade de fluxo magnético de operação menor que a densidade de

saturação, para a maioria dos casos de 12000 Gauss para o material do núcleo. A Figura 31 mostra tais características para os principais materiais analisados.

Figura 31 – Características magnéticas principais *iron powder*.



Fonte: Propriedades gerais dos materiais, [acessado em agosto 26 de 2013] disponível em: [http://www.micrometals.com/materials\\_index.html](http://www.micrometals.com/materials_index.html).

A densidade de corrente recomenda-se menor que  $450 \text{ A/cm}^2$  para não se ter perdas consideráveis por efeito joule nos enrolamentos de cobre e não interferir no desempenho do núcleo, devido elevação de temperatura. Assim adotam-se:

Densidade de fluxo magnético [T]:	1,2
Densidade de Corrente [ $\text{A/cm}^2$ ]:	450

O número de espiras do enrolamento primário pode ser obtido a partir da equação magnética do núcleo ou a partir do fator de classificação de indutância fornecido pelo fabricante. A equação magnética é apresentada em (67).

$$B \cdot N_p \cdot A_c \cdot K_p = V_{min} \cdot t_{pulso} \cdot 10^8 \quad (67)$$

Com  $B$  como a densidade de fluxo magnético de operação em Gauss,  $N_p$  como o número de espiras do enrolamento primário,  $A_c$  como a área do braço do núcleo em  $\text{cm}^2$ ,  $K_p$  como o fator de acomodação,  $V_{min}$  como a tensão de entrada em Volts e  $t_{pulso}$  como o tempo de duração do pulso em segundos. Ainda, para o núcleo adotado tem-se que:

$$N_p = \sqrt{\frac{L_p}{A_L}} \quad (68)$$

Com  $L_p$  como a indutância desejada do enrolamento primário em nH e  $A_L$  como o fator de classificação de indutância, fornecido pelo fabricante para cada tipo de núcleo. A Tabela

15 resume as características básicas e o ponto de operação do transformador elevador de alta frequência proposto.

Tabela 15 – Características básicas do transformador elevador

	Ponto Máximo de Operação Proposto
<b>Tensão pico no primário [V]:</b>	±400
<b>Corrente de pico no primário [A]:</b>	±10
<b>Corrente eficaz no primário [A]:</b>	±3,33
<b>Potência ativa transferida [W]:</b>	200
<b>Tensão pico no secundário [kV]:</b>	±6
<b>Corrente de pico no secundário [mA]:</b>	±666
<b>Corrente eficaz no secundário [mA]:</b>	±222
<b>Frequência média dos pulsos [kHz]:</b>	10
<b>Largura dos pulsos no primário [μs]:</b>	11,1
<b>Razão cíclica média [%]:</b>	0,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 16 resume o projeto físico do transformador para o núcleo toroidal T-300-52D de Micrometals proposto.

Tabela 16 – Projeto Transformador elevador

	Núcleo AM
<b>Densidade de fluxo magnético [T]:</b>	1,2
<b>Densidade de Corrente [A/cm<sup>2</sup>]:</b>	450
<b>Produto AcAe [mm<sup>4</sup>]:</b>	12152,8
<b>Núcleo</b>	<b>T-300-52D</b>
<b>Perímetro braço [mm]:</b>	79
<b>Área transversal [mm<sup>2</sup>]:</b>	338
<b>Área da janela real [mm<sup>2</sup>]:</b>	1885,74
<b>Área da janela a partir de AcAe [mm<sup>2</sup>]:</b>	35,95
<b>Número de espiras primário:</b>	52
<b>Número de espiras secundário:</b>	790
<b>Bitola condutor primário comercial [CM]:</b>	1624
<b>Tipo condutor primário comercial [awg#]:</b>	18
<b>Área ocupada da janela pelo primário [mm<sup>2</sup>]:</b>	86,74
<b>Comprimento total primário [m]:</b>	4,16
<b>Bitola condutor secundário comercial [CM]:</b>	100
<b>Tipo condutor secundário comercial [awg#]:</b>	30
<b>Área ocupada da janela pelo secundário [mm<sup>2</sup>]:</b>	80,11
<b>Comprimento total secundário [m]:</b>	62,45
<b>Isolamento esp secundário [V/espira]:</b>	7,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outras especificações construtivas mínimas de projeto são resumidas na sequência.

- Classe Condutores: Fios esmaltados com classe de isolamento ou rigidez dielétrica superior a 20kV.
- Isolação Enrolamentos: Fita Poliéster 130°C 17mm; 5 Voltas entre primário e secundário; 1 Volta entre camadas do conjunto de espiras do secundário; 2 Voltas para finalização dos enrolamentos.
- Acabamento: Terminais primário e secundário com espaguetes (30cm)
- Impregnação: Após acabamento foi impregnado com verniz em estufa (com espaguetes instalados).
- Encapsulamento e Isolação Final: Após secar adequadamente em estufa, foi encapsulado em epóxi, incluindo terminais com espaguetes, deixando saídas primário e secundário com espaguetes de aproximadamente 25cm expostos em lados distintos/opostos do encapsulamento.
- Núcleos possíveis: Núcleo T-175-40, Núcleo T-184-52, Núcleo T-175-26, Núcleo T-184-52. O Núcleo T-300-52D considerou-se como a melhor opção em relação à minimização do volume do transformador nesta aplicação.

Na Figura 32 apresenta-se detalhe de construção do transformador elevador, utilizando-se também fio encapado para o secundário de alta tensão, espaguete em teflon e cada camada foi isolada com poliéster. O primário foi enrolado por cima com fio esmaltado comum.

Figura 32 – Núcleo NT 300/52D Enrolado.



Fonte: Elaborado pelo fabricante.

O transformador com acabamento final é mostrado na Figura 87, em anexo.



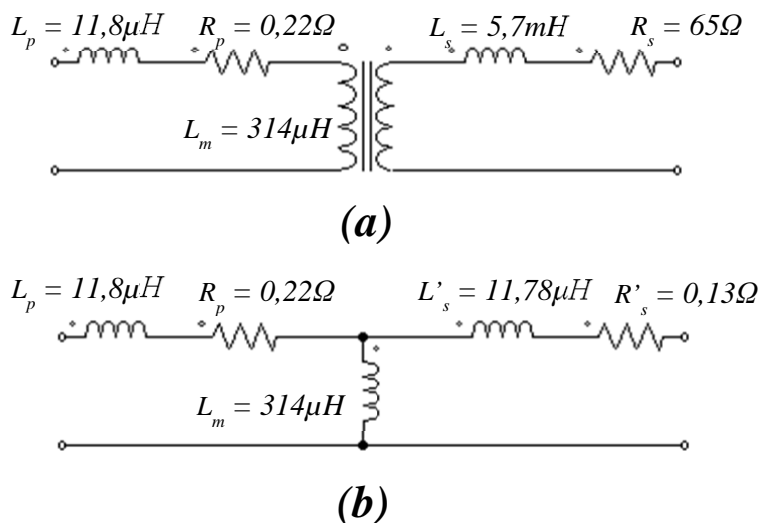
### Determinação dos parâmetros elétricos do transformador

Os parâmetros elétricos do transformador construído foram medidos para uma frequência de operação em torno de 10kHz, fazendo-se os testes em curto e em vazio obtiveram-se os valores mostrados na Figura 33 parte (a); na parte (b) são mostrados os valores do secundário refletidos para o primário dividindo o valor inicial entre a relação de elevação ao quadrado segundo as expressões ( 69 ) e ( 70 ), conforme a seguir:

$$L'_s = \frac{1}{N^2} L_s = \frac{1}{22^2} 5,7mH = 11,78\mu H \quad (69)$$

$$R'_s = \frac{1}{N^2} R_s = \frac{1}{22^2} 65\Omega = 0,13\Omega \quad (70)$$

Figura 33 – Parâmetros elétricos do transformador



Fonte: Elaborado pelo autor.

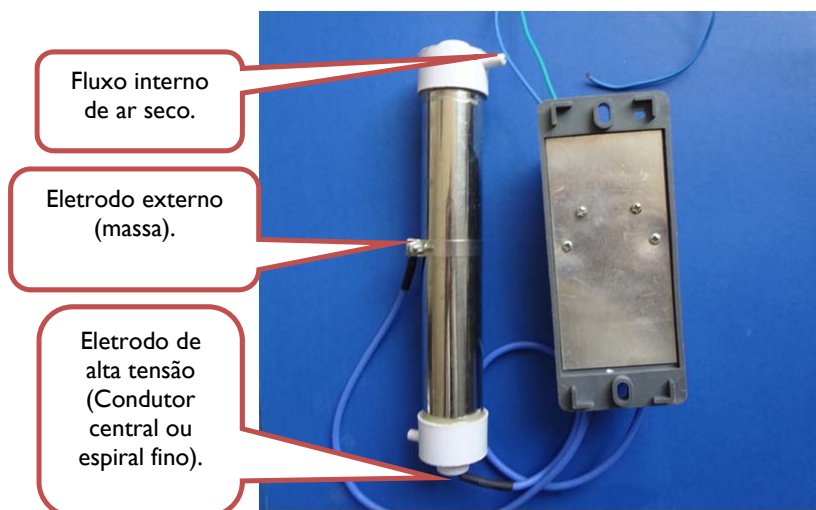
### 3.2.2. Câmaras de descarga

Fisicamente, as câmaras de descarga para geração de ozônio são geralmente fabricadas a partir de tubos ocos concêntricos, no tubo central vem enrolado de forma espiral o elétrodo de alta tensão, com um condutor fino de acordo com as baixas correntes das descargas elétricas no interior das câmaras. O seguinte tubo concêntrico corresponde ao dielétrico que evita a geração de arcos elétricos não desejados ou faíscas entre os eletrodos interno e externo, dielétrico geralmente de vidro borossilicato, material altamente resistente a variações térmicas; a permissividade dielétrica do vidro utilizado deve estar entre 5 e 10 neste tipo de

câmaras (Kinnares & Hothongkham, 2010). A Figura 34 mostra o tipo de câmara de descarga empregado.

O tubo cilíndrico oco exterior com raio aproximado de 2cm é um condutor inoxidável que atua como o outro eletrodo. A área de tratamento ou descarga corresponde ao espaço entre este eletrodo externo e o dielétrico, segundo mostra a Figura 35, espaço que permite o fluxo de ar em que o oxigênio do ar seco é parcialmente convertido em ozônio pela descarga corona. O comprimento de cada câmara é de aproximadamente 25 cm

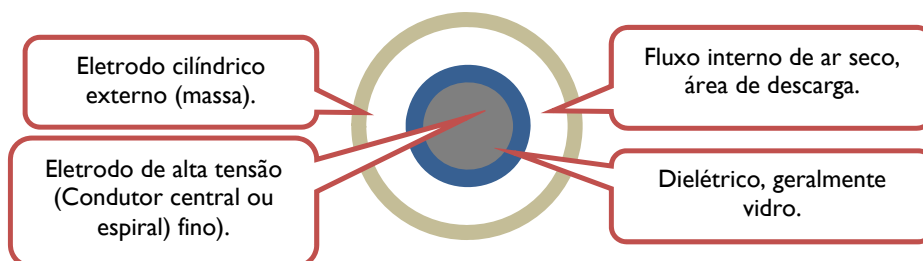
Figura 34 – Foto da Câmara de descarga



Fonte: Modificado pelo autor. MADE-IN-CHINA.COM (3G/H Quartz Tube Ozone Generator for Water Treatment, Ozonator for Water Purifier, Ozonizer for Water Treatment).

Em sistemas com frequências e tensões de operação elevadas é necessária a inclusão de outro tubo concêntrico exterior, geralmente de cobre, que contenha um fluxo de água ou líquido refrigerante para evitar incrementos indesejados na temperatura das câmaras e do sistema. Sistemas sem esfriamento pode levar à geração de incêndios a partir do aquecimento elevado do ar seco e das câmaras (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010).

Figura 35 – Diagrama interno Câmara de tratamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

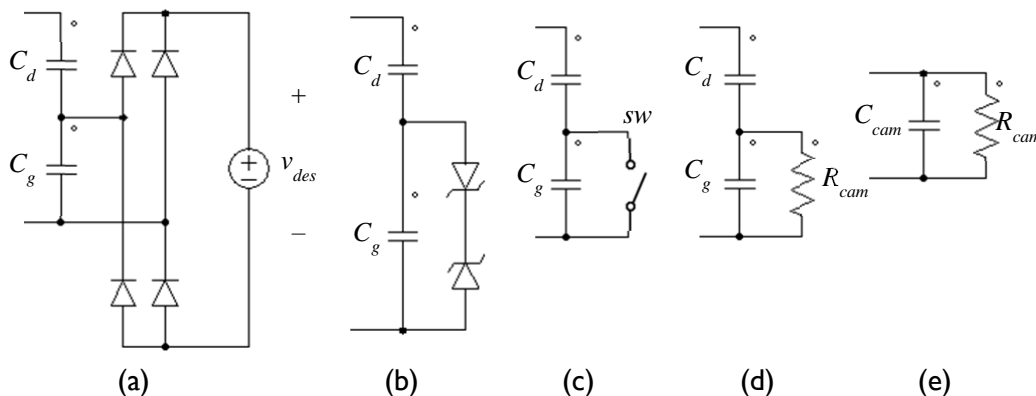
A câmara de descarga pode-se representar eletricamente segundo o circuito equivalente da Figura 36 (a), operando em baixas frequências onde os capacitores  $C_d$  e  $C_g$  representam a capacitância equivalente do dielétrico e do espaço interior de descarga existente na câmara, respectivamente. A fonte de tensão  $v_{des}$  representa a tensão mantida durante a descarga. Os diodos retificadores são usados para representar a condição de descarga, a qual é a tensão mínima entre o espaço interior da câmara necessária para iniciar as micro-descargas (ALONSO et al., 2004).

A Figura 36 (b) representa de maneira similar o explicado no parágrafo anterior, onde os diodos representam a tensão mínima necessária para iniciar as microdescargas e tensão mantida durante tais descargas (ALONSO et al., 2004).

A Figura 36(c) mostra um interruptor que representa o início da microdescarga, fazendo um curto-circuito em  $C_g$ , normalmente  $C_g \ll C_d$  (TABATA et al., 1978).

A Figura 36 (d) ilustra a derivação do modelo proposto de alta frequência do ozonizador, onde os diodos retificadores e a fonte de tensão de descarga são substituídos por uma resistência equivalente  $R_{cam}$ . A potência dissipada na resistência representa a potência fornecida ao ozonizador na forma de geração de ozônio, calor e luz, que são os três fenômenos essenciais que consomem potência ativa no ozonizador (ALONSO et al., 2004).

Figura 36 – Modelo elétrico da câmara de descarga

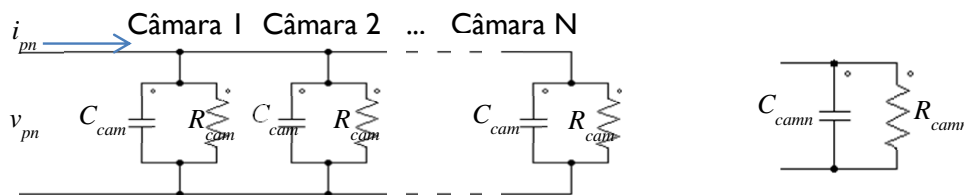


Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Finalmente, na Figura 36 (e), a câmara pode ser representada como um capacitor em paralelo com um resistor, onde as duas capacitâncias são integradas e representadas pelo seu equivalente, resultando na capacitância  $C_{cam}$  em paralelo com a resistência  $R_{cam}$ . Assim, obtém-se um modelo linear completo para a câmara do ozonizador, modelo de muitas vantagens para o projeto de conversores de potência para ozonização por sua simplicidade e

linearidade. Assim, a Figura 37 representa o circuito equivalente de  $n$  câmaras de ozônio eletricamente ligadas em paralelo.

Figura 37 – Modelo para  $n$  câmaras em paralelo



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Os parâmetros da câmara de ozônio são calculados a partir dos seus equivalentes série e paralelo conforme (71) e (72).

$$R_{camn} = \frac{R_{cam}}{N_c} \quad (71)$$

$$C_{camn} = N_c C_{cam} \quad (72)$$

### Determinação dos parâmetros da câmara

Os parâmetros elétricos do modelo das câmaras podem ser obtidos ou determinados a partir da geração do fenômeno de ressonância com a inclusão de um indutor série ou um capacitor série, as estruturas básicas para os testes e a sua operação são mostradas a seguir.

#### **Indutor série**

Para gerar o fenômeno de ressonância, um indutor ( $L_s$ ) com um valor conhecido de indutância é ligado em série entre o inversor e a câmaras de descarga formando um circuito com alto ganho na frequência de ressonância segundo mostra a Figura 38, onde a frequência natural não amortecida ( $\omega_p$ ) e o fator definido de qualidade ( $Q_p$ ) são dados por (73) e (74), respectivamente.

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_s C_{camn}}} \quad (73)$$

$$Q_p = \frac{R_{camn}}{\omega_p L_s} = \omega_p C_{camn} R_{camn} \quad (74)$$

O ganho de tensão entre a tensão obtida na câmara de descarga e a tensão de entrada no inversor ( $A_{vm}$ ) e a frequência de ressonância do circuito ( $\omega_r$ ) podem ser calculados a partir das expressões (75) e (76).

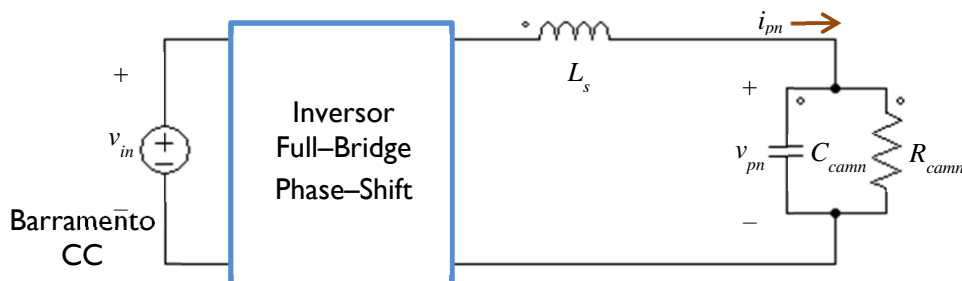
$$A_{vm} = \frac{Q_p}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q_p^2}}} \quad (75)$$

$$\omega_r = \omega_p \sqrt{1 - \frac{1}{2Q_p^2}} \quad (76)$$

A função de transferência deste circuito é dada por (77) (AMJAD, SALAM, 2013).

$$A_v = \frac{|V_{pn}(j\omega)|}{|V_{in}(j\omega)|} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}Q_p\right)^2}} \quad (77)$$

Figura 38 – Determinação parâmetros elétricos da câmara de descarga



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Ao incrementar a frequência de chaveamento do sinal gerado pelo inversor o fator  $Q_p$  cresce ( $Q_p \gg 1$ ) à medida que tal frequência se aproxima da frequência de ressonância do circuito, e o ganho de tensão também cresce podendo-se reescrever as expressões anteriores conforme (78) e (79).

$$A_{vm} \cong Q_p \quad (78)$$

$$\omega_r \cong \omega_p \quad (79)$$

Das expressões anteriores é possível reformular e isolar os parâmetros necessários  $R_{camn}$  e  $C_{camn}$ . Obtendo-se (80) e (81).

$$R_{camn} = A_{vm}\omega_r L_s \quad (80)$$

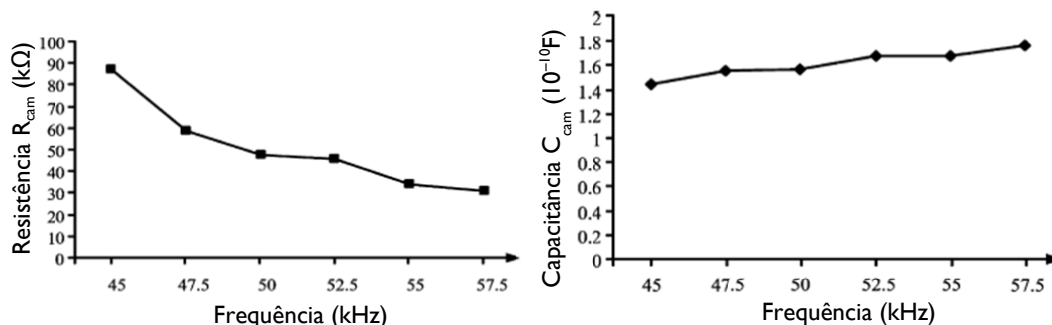
$$C_{camn} = \frac{1}{\omega_r^2 L_s} \quad (81)$$

### *Capacitor série*

A determinação dos parâmetros elétricos das câmaras de descarga pode também ser feita com a obtenção do fenômeno de ressonância a partir da inclusão de uma capacitância série conhecida, em vez de uma indutância série conhecida, e com a utilização das curvas de Lissajous geradas perto da frequência de ressonância.

Experimentos feitos por Kinnares para a determinação dos parâmetros elétricos das câmaras de descarga mostram que a capacitância equivalente incrementa o seu valor com o incremento da frequência de operação perto da frequência ressonante e que a resistência equivalente reduz o seu valor com o incremento da frequência de operação (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010). Na Figura 39 mostram-se os dados obtidos por (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010), para uma câmara de descarga com características similares ao tipo de câmara empregada neste trabalho.

Figura 39 – Parâmetros Câmara de descarga experimento Kinnares



Fonte: Modificado pelo autor (Kinnares & Hothongkham, 2010).

### *Determinação experimental*

Experimentalmente, no laboratório, os parâmetros para o arranjo de 14 câmaras em paralelo foram determinados a partir do efeito de ressonância gerado internamente pelo equipamento empregado e foram obtidos os seguintes dados, para uma frequência de operação de 10kHz:

$$R_{camn} \approx 890k\Omega \quad (82)$$

$$C_{camn} \approx 1,5nF \quad (83)$$

Assim, a partir das expressões ( 71 ) e ( 72 ) mostram-se a seguir os parâmetros elétricos de cada uma das câmaras de descarga na frequência de operação de 10kHz:

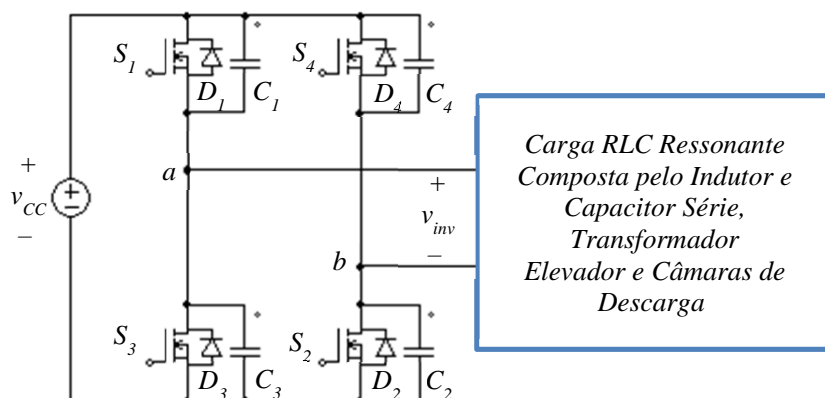
$$R_{cam} = R_{camn} \cdot N_c = 12,4M\Omega \quad (84)$$

$$C_{cam} = \frac{C_{camn}}{N_c} = 107pF \quad (85)$$

### 3.3. Modelamento do sistema

A Figura 40 mostra a ponte inversora alimentada pelo barramento CC gerado pelo conversor Boost, junto com o circuito equivalente do transformador elevador de alta frequência e as câmaras de descarga, conforme analisado no item anterior.

Figura 40 – Inversor Full-Bridge PWM Phase-shift ligado à carga.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

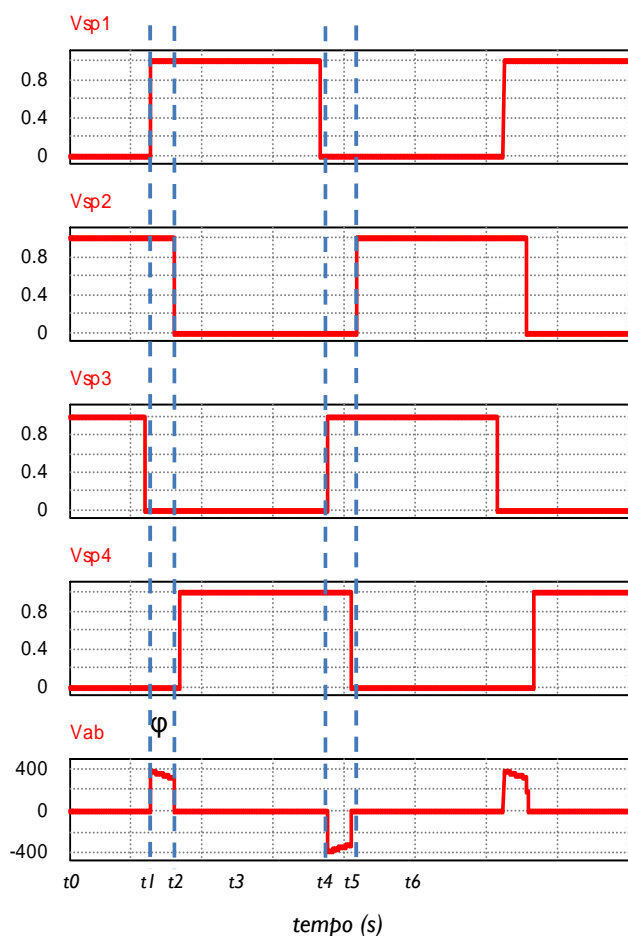
O presente trabalho considera a utilização de uma ponte inversora Full-bridge com controle por deslocamento de fase e frequência de operação constante em torno a 10kHz, com modulação de pulsos bipolares, gerados a partir do barramento CC seguido de um transformador elevador de pulsos de alta tensão e alta frequência que, junto com as câmaras de descarga, constituirão uma carga ressonante para o inversor.

Ligado a uma carga de natureza ressonante o conversor funciona como um inversor ressonante. Assim, a tensão e corrente nas câmaras de descarga e a corrente na saída do inversor apresentam formas de onda quase senoidais.

A Figura 41 mostra as características e sequência dos pulsos de controle das chaves da ponte inversora, próprias do funcionamento PWM Phase-shift. Para comutações não dissipativas, a frequência de operação da ponte inversora deve ser igual ou maior que a frequência de ressonância da carga. A partir deste ponto é analisado eletricamente cada um dos dez subintervalos de tempo ou estágios de operação que podem ser diferenciados. Os circuitos elétricos ativos em cada estado identificado são mostrados na Figura 42.

No tempo de comutação é considerado um tempo morto  $t_{delay}$  para evitar curto-circuito frente a chaveamentos indesejados em transistores do mesmo braço (isto é, S1 – S3 e S4 – S2). Os sinais para as chaves do segundo braço S4 e S2 tem uma defasagem  $\varphi$  em relação aos sinais para as chaves do primeiro braço S1 e S3, segundo a natureza da operação PWM Phase-shift. A tensão de saída pode ser variada mudando o valor do ângulo de defasagem  $\varphi$ . O ângulo  $\theta$  corresponde à defasagem entre a corrente e a tensão de saída do inversor.

Figura 41 – Sequência de pulsos e tensão ( $V_{ab}$ ) na saída do inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

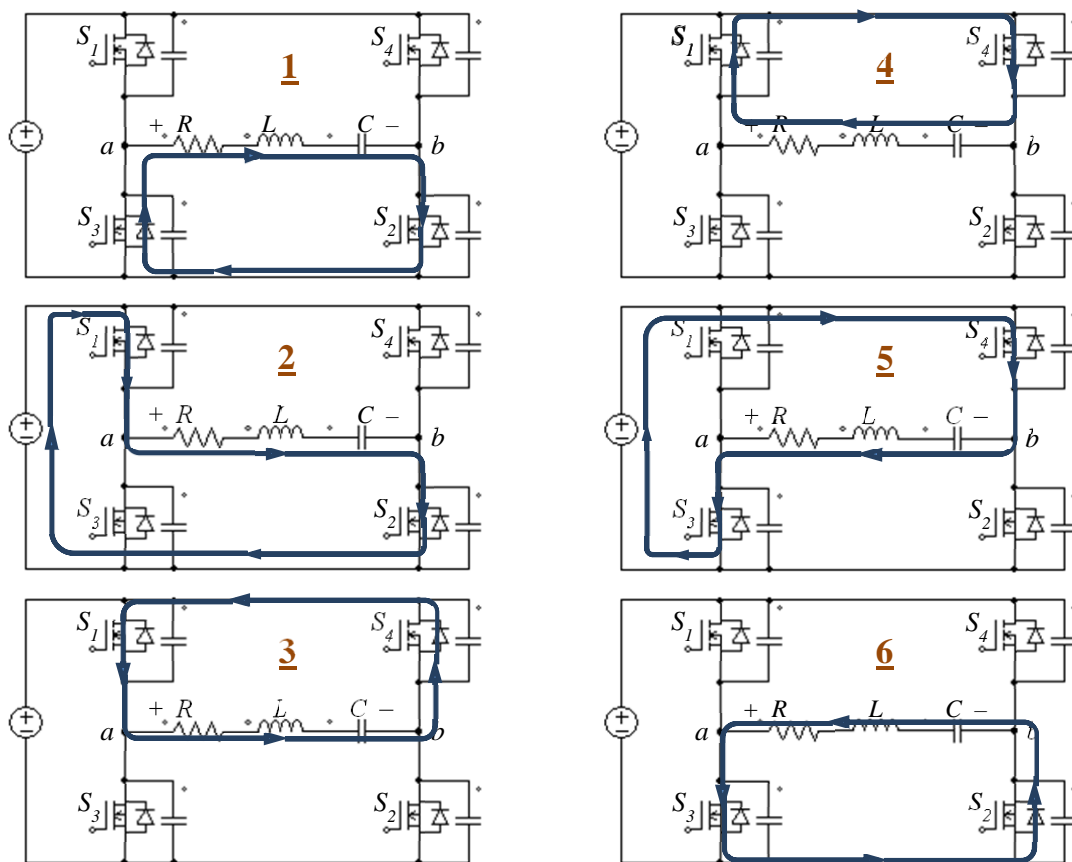
Etapa 1, intervalo ( $t_0, t_1$ ): Este intervalo é um tempo de roda livre onde ocorre a comutação com corrente zero de S3, durante este intervalo a tensão  $V_{ab}$  de saída é zero e a corrente no indutor ressonante e a tensão no capacitor ressonante, mostrados na estrutura proposta da Figura 13, evoluem de forma ressonante; a corrente flui através de D3, S2 e a carga. Desta forma, durante esta etapa S3 é comandado para o bloqueio com corrente nula



(ZCS). Em  $t=t_1$  o transistor S1 é comandado para a condução, provocando o bloqueio de D3 e tendo-se início à segunda etapa.

Etapa 2, intervalo  $(t_1, t_2)$ : Esta é uma etapa de transferência de energia, onde a fonte do barramento CC fornece energia à carga. Os transistores S1 e S2 encontram-se ligados e conduzindo, como sequência do estado anterior e resultando em uma tensão  $V_{ab}$  positiva na carga (por um tempo correspondente à defasagem  $\phi$ ). A tensão ressonante no capacitor torna-se positiva. Assim, em  $t=t_2$  o transistor S2 é bloqueado e o diodo D4 assume a corrente da carga equivalente, entrando em condução e dando início à terceira etapa.

Figura 42 – Etapas de operação do inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Etapa 3, intervalo  $(t_2, t_3)$ : Neste intervalo de tempo novamente tem-se a roda livre da energia na carga equivalente, onde o transistor S1 e o diodo D4 conduzem a corrente ressonante ainda positiva (fluindo ponto a para b), sendo  $V_{ab}$  nula no intervalo. Durante esta etapa S4 é comandado para a condução com tensão nula (ZVS). A corrente no indutor e a tensão no capacitor continuam a evoluir de forma ressonante, a corrente decrescendo e a

tensão no capacitor aumentando, até que, em  $t=t_3$  a corrente vai até zero e a tensão no capacitor ressonante se faz máxima.

Etapa 4, intervalo  $(t_3,t_4)$ : Este é outro período de roda livre ressonante como continuação da etapa anterior, mas com a mudança de polaridade da corrente ressonante na carga. Assim, o transistor S4, previamente comandado para a condução de forma ZVS, assume a corrente em conjunto com o diodo D1. A tensão entre os pontos a e b permanece nula durante este intervalo. A corrente ressonante, agora invertida, continua a evoluir de forma ressonante com a tensão do capacitor, agora decrescendo em relação ao ponto máximo obtido no final do intervalo anterior.

Assim, durante esta etapa S1 é comando para o bloqueio com corrente nula (ZCS, devido condução do diodo D1). No instante  $t=t_4$  o transistor S3 é comandado para a condução, provocando o bloqueio de D1 e dando início à quinta etapa.

Etapa 5, intervalo  $(t_4,t_5)$ : Neste intervalo S3 e S4 estão ligadas e em condução. A corrente flui do barramento CC através de S4 e S3 até a carga, sendo uma etapa de transferência de energia. Contudo, agora com uma tensão  $V_{ab}$  negativa correspondente a  $-V_{CC}$  e uma corrente negativa na carga. A corrente no indutor e a tensão no capacitor continuam evoluindo de forma ressonante, até que, em  $t=t_5$  a tensão no capacitor torna-se negativa, polarizando diretamente o diodo D2. Com o bloqueio de S4 o diodo em antiparalelo de S2, D2, assume a condução da corrente na carga equivalente, dando início à sexta etapa.

Etapa 6, intervalo  $(t_5,t_6)$ : Nesta etapa o transistor S3 e o diodo D2 conduzem a corrente da carga. Durante este intervalo a tensão  $V_{ab}$  permanece novamente nula e a corrente no indutor e a tensão no capacitor continuam evoluindo de forma ressonante. Durante esta etapa S2 é comandado para a condução com tensão nula (ZVS), devido a condução de seu diodo em antiparalelo, até que, no final do intervalo, em  $t=t_6$ , a corrente ressonante volta a zero e a tensão no capacitor se faz máxima na polaridade negativa. Desta forma em  $t=t_6$ , o diodo D2 é bloqueado e a corrente ressonante volta a se inverter, dando início à condução de S2 e D3. Desta forma, em regime permanente, todas as etapas aqui descritas se repetem ciclicamente.

O comportamento ressonante da corrente no indutor e da tensão no capacitor é mostrada de forma experimental na Figura 68 do capítulo seguinte.

A tensão  $V_{ab}$  apresentada na Figura 41 demonstra a obtenção dos pulsos bipolares de tensão, obtidos pelo conversor proposto com uma frequência de operação de 8,2kHz, pulsos estes que serão aplicados à carga ressonante composta pelos elementos série ressonante, transformador elevador e câmaras de descarga, conforme apresentado no item a seguir.

Os capacitores em paralelo com cada chave determinam a partir do seu tempo de carga e descarga o crescimento e decrescimento do formato dos pulsos de tensão. Assim, capacitores cerâmicos ou de poliester entre 1 e 5 nF @ 450v são os recomendados para esta aplicação.

Todas as chaves deste estágio têm como esforços máximos de tensão a tensão do barramento CC, admitindo-se aqui o valor de 400V como tensão máxima de bloqueio. Assim, os transistores podem ser escolhidos de maneira similar ao transistor para a fonte Boost, no que se refere à esforços de tensão.

Sendo os transistores S1, S2, S3 e S4 admitidos como Mosfets, os diodos D1, D2, D3 e D4 intrínsecos aos mesmos (diodos em antiparalelo com as chaves) poderiam ser utilizados para a estrutura inversora ressonante. Desta forma, considerando-se a aplicação em baixa potência e necessidade de redução de custos da implementação, foram adotados Mosfets de potência para S1, S2, S3 e S4.

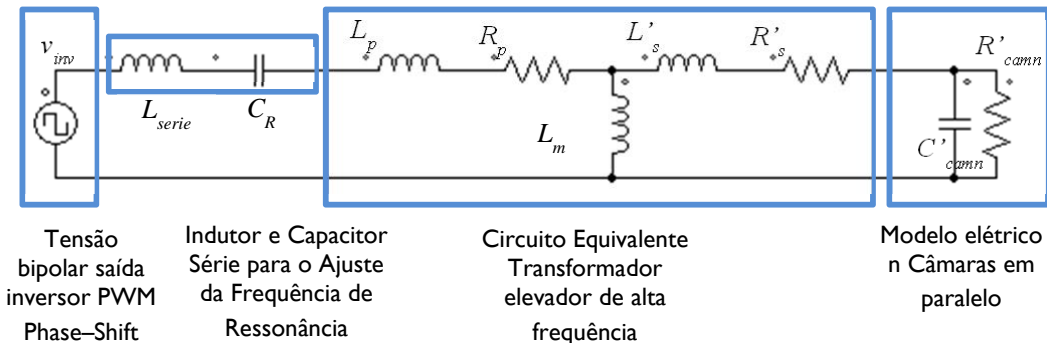
Por outro lado, observa-se que S1 e S3 comutam para o bloqueio com correntes nulas (ZCS), correspondentes ao braço esquerdo da ponte inversora. Assim como, S2 e S4 comutam para a entrada em condução com tensões nulas (ZVS), correspondentes ao braço direito da ponte inversora. Portanto, os semicondutores mais recomendados para ZCS (S1 e S3) seriam os IGBTs com diodos encapsulados em antiparalelo e interruptores Mosfets para os que comutam ZVS (S2 e S4). Entretanto, considerando-se os custos relativos dos IGBTs e a baixa potência da aplicação, decidiu-se por manter todos os interruptores com tecnologia Mosfet. Contudo, para aplicações em potências maiores, poder-se-ia avaliar melhor a relação custo e benefício com redução de perdas pelo uso de IGBTs, nos interruptores do braço esquerdo da ponte inversora.

### ***3.3.1. Circuito equivalente do estágio de saída***

O circuito equivalente aproximado para o estágio de saída, envolvendo inversor, elementos série ressoante, o transformador de alta frequência e as câmaras de descarga é mostrado na Figura 43. Em conjunto, o transformador, o indutor e capacitor série e as câmaras de descarga constituem a carga ressonante da ponte inversora.

Os parâmetros do circuito equivalente, tanto do transformador como das câmaras, podem ser obtidos a partir de medições e cálculos para o modelamento do sistema.

Figura 43 – Circuito equivalente do estágio de saída.



$$I : N$$

Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Um circuito equivalente aproximado simplificado, segundo mostra a Figura 44, pode ser obtido agrupando-se as indutâncias de dispersão do transformador do primário e do secundário refletida ao primário, junto com a indutância de ajuste do indutor série  $L_{serie}$  em  $L_T$  e as resistências dos enrolamentos do transformador e do indutor série em  $R_T$ , com os valores das impedâncias na frequência de operação da ponte inversora, assim:

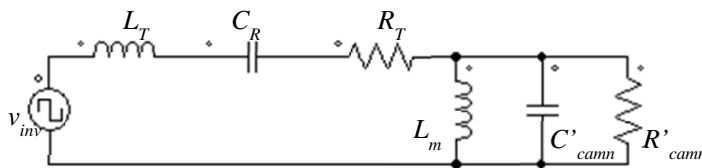
$$L_T = L_p + \frac{1}{N^2} L_s + L_{serie} \tag{86}$$

$$C_c = C'_{camn} = N^2 C_{camn} \tag{87}$$

$$R_T = R_p + \frac{1}{N^2} R_s + R_{Lserie} \tag{88}$$

$$R_c = R'_{camn} = \frac{1}{N^2} R_{camn} \tag{89}$$

Figura 44 – Circuito equivalente simplificado.

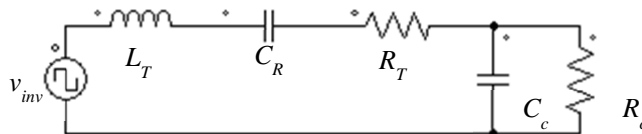


Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Para a análise e simplificação do circuito equivalente ressonante a indutância de magnetização pode ser desprezada, e os parâmetros de ajuste  $L_{serie}$  e  $C_R$  são adotados para fixar uma frequência de ressonância desejada e uma tensão e corrente de saída ressonante

adequada. A relação de elevação do transformador elevador construído é de aproximadamente  $N = 22$ .

Figura 45 – Circuito equivalente simplificado final.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

A resistência da carga  $R'_{camm}$  diminui seu valor com o incremento da frequência de operação. A capacitância equivalente  $C_T$  aumenta seu valor com o incremento da frequência de operação (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010).

### **Determinação e ajuste da frequência de ressonância**

Para fixar a frequência de operação ou ressonância do circuito pode-se utilizar o circuito equivalente da Figura 45, onde a frequência de ressonância corresponde ao ponto onde a parte reativa da impedância total faça-se zero, assim a impedância total do circuito é definida pela expressão (90) e, evoluindo-a, por (91) e (92).

$$Z_{total} = \frac{-j}{\omega C_R} + j\omega L_T + R_T + \left( \frac{-j}{\omega C_c} || R_c \right) \quad (90)$$

$$Z_{total} = \frac{-j}{\omega C_R} + j\omega L_T + R_T + \frac{R_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - j \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} \quad (91)$$

$$Z_{total} = R_T + \frac{R_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} + j \left( \omega L_T - \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - \frac{1}{\omega C_R} \right) \quad (92)$$

Fazendo a parte imaginária igual a zero tem-se (93).

$$\omega L_T - \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - \frac{1}{\omega C_R} = 0 \quad (93)$$

Isolando a capacitância  $C_R$  pode-se determinar o seu valor a partir de dados conhecidos e adotados para fixar a frequência de ressonância do sistema. Por exemplo, os parâmetros das câmaras de descarga já são conhecidos para uma frequência perto da frequência de ressonância e perto da frequência de chaveamento. Assim, o indutor  $L_{serie}$  é fixado em 2,2mH, valor que compõe o parâmetro  $L_T$ , onde as indutâncias de dispersão também são conhecidas. Desta forma, tem-se (94):

$$C_R = \frac{1}{\omega \left( \omega L_T - \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} \right)} \quad (94)$$

A frequência de ressonância  $\omega$  também pode ser isolada e determinada a partir de parâmetros conhecidos de capacitância ressonante  $C_R$  e do indutor série ressonante  $L_{serie}$ , se for desejado.

Assim, para uma frequência de ressonância ( $\approx 7,1kHz$ ) um tanto inferior à frequência de operação (8,2kHz), tem-se a necessidade da inclusão de um indutor série  $L_{serie}$  de 2,2mH e uma capacitância ressonante  $C_R$  de 204nF. Com estes dados obtém-se um ponto de operação adequado para a aplicação.

A frequência de ressonância pode ser verificada no diagrama de bode da função de transferência que relaciona a tensão de saída com a tensão bipolar fornecida pelo inversor. Também pode-se verificar na função de transferência que relaciona a corrente ressonante pelo primário do transformador com a tensão de entrada fornecida pelo inversor. A função de transferência da tensão de saída nas câmaras de descarga em relação à tensão de entrada pode-se obter a partir de um divisor de tensão entre as impedâncias envolvidas, conforme (95).

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{C_R R_c s}{(C_c C_R L_T R_c) s^3 + (C_R L_T + C_c C_R R_T R_c) s^2 + (C_c R_c + C_R R_T + C_R R_c) s + 1} \quad (95)$$

Com os valores dos componentes tem-se a seguinte função numérica determinada em (96).

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{s}{2,231 \times 10^{-9} s^3 + 3,487 \times 10^{-6} s^2 + 4,505 s + 2625} \quad (96)$$

A função de transferência entre a corrente ressonante  $I_{Lserie}$  e a tensão de entrada pode ser obtida a partir da lei de ohm de entrada, onde a impedância total representa a relação entre tensão e corrente de entrada. Assim, o inverso da impedância total representa a função de transferência procurada. Ou, a partir da função de transferência anterior, definindo a tensão de saída como a corrente  $I_{Lserie}$  vezes a impedância das câmaras de descarga, conforme (97).

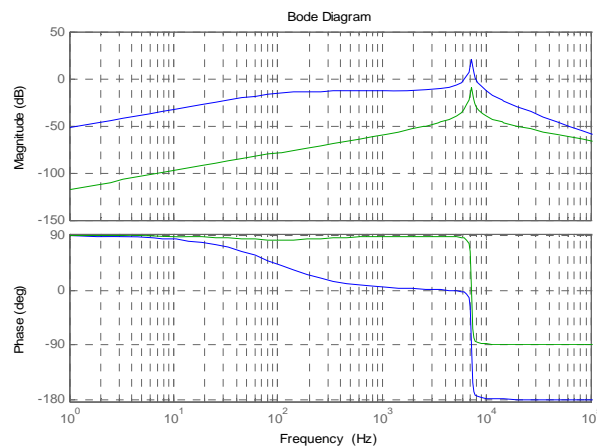
$$\frac{I_{Lserie}}{v_{in}} = \frac{C_c C_R R_c s^2 + C_R s}{(C_c C_R L_T R_c) s^3 + (C_R L_T + C_c C_R R_T R_c) s^2 + (C_c R_c + C_R R_T + C_R R_c) s + 1} \quad (97)$$

Com os valores dos componentes tem-se a seguinte função numérica para (97), conforme (98):

$$\frac{I_{Lserie}}{v_{in}} = \frac{s^2 + 749,1s}{0,003074s^3 + 4,802s^2 + 6,205 \times 10^6s + 3615 \times 10^9} \quad (98)$$

Na Figura 45 a linha superior representa o comportamento em frequência da função de transferência para a tensão de saída e a linha inferior o comportamento da função de transferência para a corrente ressonante. Pode-se observar o ponto ressonante perto dos 7kHz, uma frequência de chaveamento superior a esta frequência de ressonância garantirá um bom comportamento ressonante como comutação ZCS (braço esquerdo) e ZVS (braço direito) para a ponte inversora.

Figura 46 – Diagrama de bode para as funções de transferência analisadas do circuito equivalente de saída ressonante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### **Modelamento matemático do circuito equivalente simplificado**

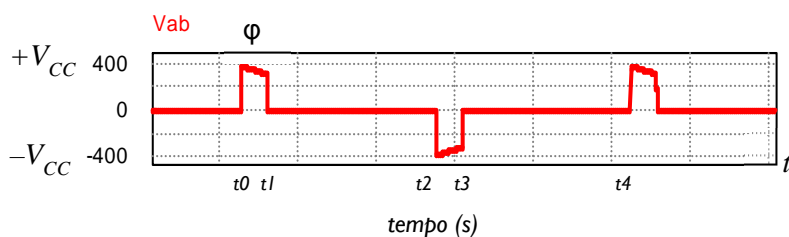
Com o objetivo de compreender as características preliminares de tensões e correntes dos circuitos de saída da ponte inversora e da carga, realiza-se o modelamento matemático do circuito equivalente simplificado. Análise que pode ser baseada na redução de equações diferenciais de segunda ordem, para a qual são feitas as seguintes considerações (KINNARES, HOTHONGKHAM, 2010):

- Componentes elétricos ideais.
- $t_{off}$  tempo morto insignificante.
- Os parâmetros são referidos para o primário do transformador.
- O efeito da indutância de magnetização  $L_m$  pode ser desprezado.

Com estas considerações, a tensão aplicada ao conjunto transformador, indutor e câmaras pode-se supor segundo se mostra na Figura 47.

O circuito equivalente para cada estado é mostrado na Figura 48, a parte (a) correspondente aos intervalos de tempo onde esta apresenta a tensão  $+V_{CC}$  ou  $-V_{CC}$ , ou seja, nos intervalos  $t_0-t_1$  e  $t_2-t_3$  da Figura 47. A parte (b) corresponde aos intervalos onde a tensão na saída do inversor é zero, ou seja, nos intervalos  $t_1-t_2$  e  $t_3-t_4$ .

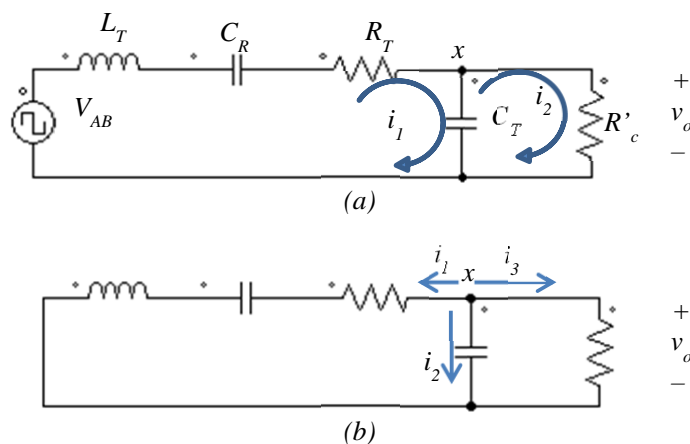
Figura 47 – Tensão pulsada  $V_{ab}$  de saída do inversor



Fonte: Modificado pelo autor (Kinnares & Hothongkham, 2010).

Intervalo  $t_0-t_1$ : A partir da análise de tensões de malha e correntes da Figura 45, obtêm-se as seguintes equações para o circuito da parte (a) desta Figura 48, com tensão positiva  $+V_{CC}$ , ou seja, o intervalo  $t_0-t_1$ .

Figura 48 – Circuitos equivalentes de segunda ordem.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Tensões na malha 1:

$$V_{CC} = V_{L_T} + V_{R_T} + v_o \quad (99)$$

$$V_{CC} = L_T \frac{di_1}{dt} + i_1 R_T + v_o \quad (100)$$



Corrente no capacitor  $C_T$ , conforme (101):

$$i_1 - i_2 = C_T \frac{dv_o}{dt} \quad (101)$$

$$i_1 - \frac{v_o}{R'_c} = C_T \frac{dv_o}{dt} \quad (102)$$

$$i_1 = C_T \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R'_c} \quad (103)$$

Substituindo  $i_1$  na expressão (100) para  $V_{CC}$ , tem-se:

$$V_{CC} = L_T \frac{d}{dt} \left( C_T \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R'_c} \right) + \left( C_T \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R'_c} \right) R_T + v_o \quad (104)$$

Obtém-se uma equação diferencial de segunda ordem para a tensão de saída na carga ou câmara de descarga, conforme (105) e (106).

$$L_T C_T \frac{d^2 v_o}{dt^2} + \frac{L_T}{R'_c} \frac{dv_o}{dt} + C_T R_T \frac{dv_o}{dt} + \frac{R_T}{R'_c} v_o + v_o = V_{CC} \quad (105)$$

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{R'_c C_T} + \frac{R_T}{L_T} \right) \frac{dv_o}{dt} + \frac{1}{L_T C_T} \left( \frac{R_T}{R'_c} + 1 \right) v_o = \frac{V_{CC}}{L_T C_T} \quad (106)$$

Renomeando (106) tem-se que:

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + b \frac{dv_o}{dt} + a v_o = a V_{CC} \quad (107)$$

Solucionando a equação (107) obtém-se (108) para a tensão de saída. Pode-se Agrupar componentes da forma  $e^{-j\omega t}$  e  $e^{j\omega t}$  em termos de seno e cosseno a partir da relação de Euler, inferindo o comportamento oscilante periódico da tensão nas câmaras de descarga  $v_o$ .

$$v_o = \frac{V_{CC}}{c} + cte_0 e^{-\left(\frac{b-\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} + cte_1 e^{-\left(\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} \quad (108)$$

Com as condições iniciais  $t=0$ ,  $v_o(0)=v_{oi}$  e a corrente inicial do primário do transformador  $i_1(0)=i_{1i}$ , obtêm-se as constantes  $cte_0$  e  $cte_1$  para a solução de (108), conforme (111).

$$v_o(0) = v_{oi} \quad (109)$$

$$\frac{dv_o(0)}{dt_0} = \frac{1}{C_T} \left( i_{1i} - \frac{v_{oi}}{R'_c} \right) \quad (110)$$

$$v_o = V_{CC} - L_T \frac{di_1}{dt} - i_1 R_T \quad (111)$$

De maneira similar, a corrente de saída da ponte inversora ou de entrada ao transformador é definida a partir da equação diferencial de segunda ordem gerada ao

substituir a tensão de saída isolada na expressão da corrente, conforme se mostra na sequência.

Com (112), obtém-se (113):

$$i_1 = C_T \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R'_c} \quad (112)$$

$$i_1 = C_T \frac{d}{dt} \left( V_{CC} - L_T \frac{di_1}{dt} - i_1 R_T \right) + \frac{1}{R'_c} \left( V_{CC} - L_T \frac{di_1}{dt} - i_1 R_T \right) \quad (113)$$

Reorganizando (113) obtém-se:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{R'_c C_T} + \frac{R_T}{L_T} \right) \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{L_T C_T} \left( \frac{R_T}{R'_c} + 1 \right) i_1 = \frac{1}{L_T C_T} \frac{v_o}{R'_c} \quad (114)$$

Renomeando (114) obtém-se (115):

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + b \frac{di_1}{dt} + a c i_1 = a \frac{v_o}{R'_c} \quad (115)$$

Solucionando a equação (115) obtém-se a expressão (116) para a corrente de saída do inversor, similar à expressão obtida para a tensão na carga equivalente.

$$i_1 = \frac{1}{c} \frac{v_o}{R'_c} + c t e_0 e^{-\left(\frac{b-\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} + c t e_1 e^{-\left(\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} \quad (116)$$

Com as condições iniciais anteriormente informadas, obtêm-se as constantes  $c t e_0$  e  $c t e_1$  da solução para a corrente  $i_1$ , onde:

$$i_1(0) = i_{1i} \quad (117)$$

$$\frac{di_1(0)}{dt_0} = \frac{1}{L_T} (V_{CC} - i_{1i} R_T - v_{oi}) \quad (118)$$

Intervalo  $t1-t2$ : Neste intervalo mostrado na Figura 47 a tensão de saída do inversor é zero (0) e o circuito a analisar corresponde à parte (b) da Figura 48. A partir da análise de correntes e das tensões na malha externa, pode-se obter uma equação diferencial de segunda ordem para representar a tensão na carga  $v_o$  da seguinte maneira.

Considerando-se as Leis de Kirchhoff tem-se que:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (119)$$

$$i_1 = -C_T \frac{dv_o}{dt} - \frac{v_o}{R'_c} \quad (120)$$

Considerando as tensões na malha exterior, tem-se que:

$$v_o = L_T \frac{di_1}{dt} + R_T i_1 \quad (121)$$

Substituindo  $i_1$  na expressão (121) tem-se que:

$$v_o = L_T \frac{d}{dt} \left( -C_T \frac{dv_o}{dt} - \frac{v_o}{R'_c} \right) + R_T \left( -C_T \frac{dv_o}{dt} - \frac{v_o}{R'_c} \right) \quad (122)$$

Obtém-se desta forma uma equação diferencial de segunda ordem para a tensão de saída na carga ou câmara de descarga, conforme (123).

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{R'_c C_T} + \frac{R_T}{L_T} \right) \frac{dv_o}{dt} + \frac{1}{L_T C_T} \left( \frac{R_T}{R'_c} + 1 \right) v_o = 0 \quad (123)$$

Renomeando (123) tem-se que:

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + b \frac{dv_o}{dt} + ac v_o = 0 \quad (124)$$

Solucionando a equação (124) obtém-se a expressão (125) para a tensão de saída.

$$v_o = cte_0 e^{-\left(\frac{b-\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} + cte_1 e^{-\left(\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} \quad (125)$$

Com as condições iniciais para este intervalo  $t=t_1=0$ ,  $v_o(t_1)=v_{oi}$  e a corrente inicial do primário do transformador  $i_l(t_1)=i_{li}$ , obtêm-se as constantes  $cte_0$  e  $cte_1$  para a solução de (125), conforme:

$$v_o(t_1) = v_{oi} \quad (126)$$

$$\frac{dv_o(t_1)}{dt_0} = -\frac{1}{C_T} \left( i_{li} + \frac{v_{oi}}{R'_c} \right) \quad (127)$$

Desta forma, de maneira similar, a corrente de saída da ponte inversora é definida pela equação diferencial (128).

$$i_1 = -C_T \frac{d}{dt} \left( L_T \frac{di_1}{dt} + R_T i_1 \right) - \frac{1}{R'_c} \left( L_T \frac{di_1}{dt} + R_T i_1 \right) \quad (128)$$

Reorganizando (128) tem-se (129):

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{R'_c C_T} + \frac{R_T}{L_T} \right) \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{L_T C_T} \left( \frac{R_T}{R'_c} + 1 \right) i_1 = 0 \quad (129)$$

Renomeando (129) tem-se (130):

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + b \frac{di_1}{dt} + ac i_1 = 0 \quad (130)$$

Solucionando a equação (130) obtém-se a expressão (131) para a corrente de saída do inversor, similar à expressão obtida para a tensão na carga equivalente.

$$i_1 = cte_0 e^{-\left(\frac{b-\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} + cte_1 e^{-\left(\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2}\right)t} \quad (131)$$

Com as condições iniciais anteriormente descritas, conforme (132) e (133), para este intervalo, obtém-se as constantes  $cte_0$  e  $cte_1$  para a solução para a corrente  $i_l$ .

$$i_1(t_1) = i_{1i} \quad (132)$$

$$\frac{di_1(t_1)}{dt_0} = \frac{1}{L_T} (i_{1i} R_T - v_{oi}) \quad (133)$$

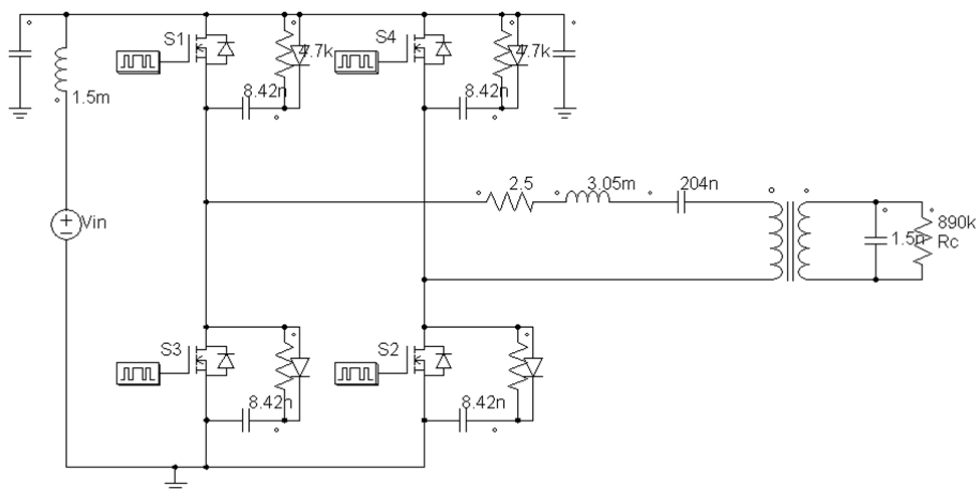
Intervalo  $t_2-t_3$ : A partir da análise de tensões de malha e lei de Kirchhoff para este intervalo e de maneira análoga ao intervalo  $t_0-t_1$ , mas com a tensão negativa  $-V_{CC}$  fornecida pela ponte inversora, podem ser obtidas todas as expressões conforme se demonstrou anteriormente.

Utilizando as equações desenvolvidas e os parâmetros aproximados do circuito equivalente tem-se o circuito apresentado na Figura 49, para simulação do estágio de saída. As principais formas de ondas são apresentadas na Figura 49 e Figura 49.

As formas de onda da tensão e corrente na carga podem ser verificadas na Figura 51, considerando-se frequência de chaveamento fixa em 8,2kHz, assim como as correntes no primário e através das chaves S2 e S4 que constituem o braço cujas chaves comutam ZVS na entrada em condução.

Os resultados da forma de onda da tensão nas câmaras de descarga e a corrente de saída do inversor são da forma senoidal ressonante desejada, a condição de comutações ZVS (comutação em tensão zero) e ZCS (comutação em corrente zero) são observadas na Figura 49, de forma completa para todas as chaves da ponte inversora ressonante.

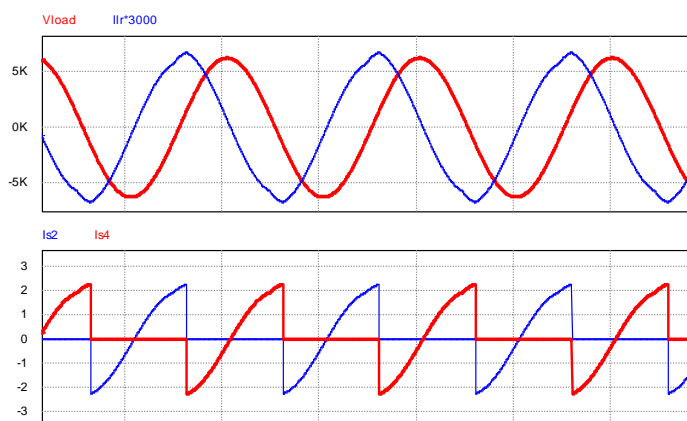
Figura 49 – Ponte inversora e Circuito equivalente.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

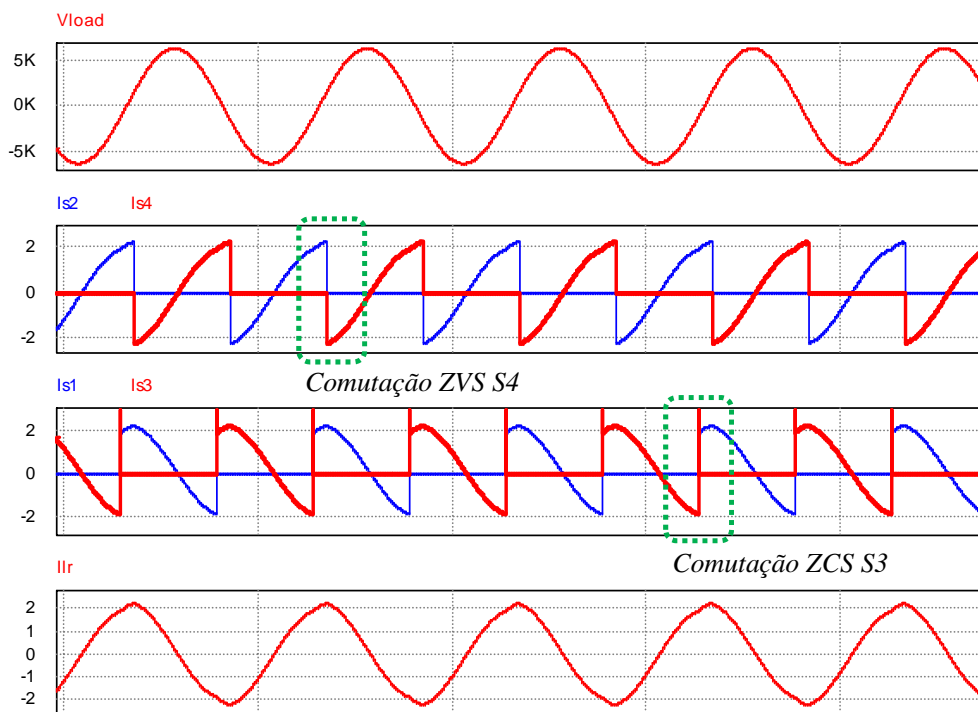
A Figura 50 mostra ainda a defasagem entre a tensão de saída nas câmaras de descarga e a corrente ressonante de saída da ponte, pode-se verificar que em tensão máxima a corrente é zero e quando a corrente é máxima a tensão é zero, fato relacionado diretamente com a característica ressonante da carga equivalente, onde a corrente e a tensão em questão tem uma defasagem de  $-90$  graus, fato também evidente no plano de fase da Figura 46, após a frequência de ressonância.

Figura 50 – Tensão de saída e corrente ressonante, detalhe das correntes no braço ZVS.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

Figura 51 – Formas de onda na ponte inversora.



Fonte: Elaborado pelo autor. PSIM.

### 3.4. Conclusões

O fato de ter pulsos bipolares apresenta vantagens na redução de problemas de saturação do núcleo, incrementando assim a densidade de fluxo que pode-se empregar no projeto do mesmo, aproveitando melhor a transferência de potência e reduzindo igualmente o número de espiras.

Com o objetivo de reduzir perdas por dispersão é necessário o projeto de um núcleo com alta indução magnética, permitindo ainda a redução do número de espiras tanto no primário e, mais importante ainda, no secundário, devido a aplicação em alta tensão de saída.

Um núcleo com alta indução magnética melhora um dos principais problemas nos transformadores elevadores de pulsos de alta frequência, correspondente à dispersão a partir da baixa indução magnética o densidade de fluxo, como por exemplo como se observa com núcleos de Ferrite.

No conversor Boost do estágio de entrada, quanto maior a tensão de saída neste conversor, melhor será a correção natural do fator de Potência de entrada, ou seja, menor será o conteúdo harmônico da corrente de entrada.

No projeto do indutor Boost, o objetivo foi encontrar o valor máximo da indutância, a qual, para uma frequência de chaveamento definida, transfere a máxima corrente média à carga em um período da rede, mantendo a operação no Modo de Condução Descontínua (MCD).

Quanto maior for o capacitor do filtro de tensão na saída do retificador Boost, maior será a corrente inicial de carga no momento de ligar o circuito, levando à necessidade de incluir um circuito para a limitação desta corrente de *inrush*.

No projeto do compensador para o controle da tensão de saída do estágio Boost, para que a saída seja estável, deve-se garantir um margem de fase maior a 45 graus a partir de uma derivada de  $-20\text{dB/dec}$  do ganho na frequência de cruzamento, assim como, para garantir o erro nulo em regime para o degrau, admite-se um polo na origem para a função de laço aberto.

Fisicamente, as câmaras de descarga para geração de ozônio são geralmente fabricadas a partir de tubos ocos concêntricos. Em sistemas com frequências e tensões de operação elevadas é necessária a inclusão de outro tubo concêntrico exterior, geralmente de cobre, que contenha um fluxo de água ou líquido refrigerante para evitar incrementos indesejados na temperatura das câmaras e do sistema.

---

A câmara pode ser representada como um capacitor em paralelo com um resistor, assim, obteve-se neste capítulo um modelo linear completo para a câmara do sistema ozonizador.

Na determinação dos parâmetros elétricos das câmaras de descarga conclui-se que a capacitância equivalente incrementa o seu valor com o incremento da frequência de operação perto da frequência ressonante e que a resistência equivalente reduz o seu valor com o incremento da frequência de operação.

Considerou-se a utilização de uma ponte inversora Full-bridge com controle por deslocamento de fase e modulação bipolar para o estágio de saída, associado em cascata com o estágio de entrada retificador Boost.

Considerando a natureza da carga no estágio de saída inversor, elementos série ressonantes associados ao primário de um transformador elevador de pulsos, de alta tensão e alta frequência, e o conjunto formado pelas câmaras de descarga, constituirão uma carga ressonante equivalente para o estágio inversor. Assim, o segundo estágio consistiu no uso de um inversor em Ponte Completa (Full-bridge) ressonante com controle por deslocamento de fase (Phase-shift), frequência constante (8,2kHz) e modulação bipolar.

Ligado a uma carga de natureza ressonante o conversor funciona como um inversor ressonante. Assim, a tensão e corrente nas câmaras de descarga e a corrente na saída do inversor apresentam formas de onda quase senoidais.

Para uma comutação ou operação de ZVS e ZCS, a frequência de operação da ponte inversora deve ser igual ou maior que a frequência de ressonância da carga total.

A ponte inversora com controle PWM phase-shift tem vantagens em relação à tensão de saída e à concentração de ozônio gerado em comparação como a ponte PWM convencional.

O inversor com controle PWM phase-shift permite manter constante a tensão aplicada na câmara para variações da frequência. Além de manter a tensão na saída, possibilita o aumento da produção de ozônio ao incrementar a frequência de chaveamento.

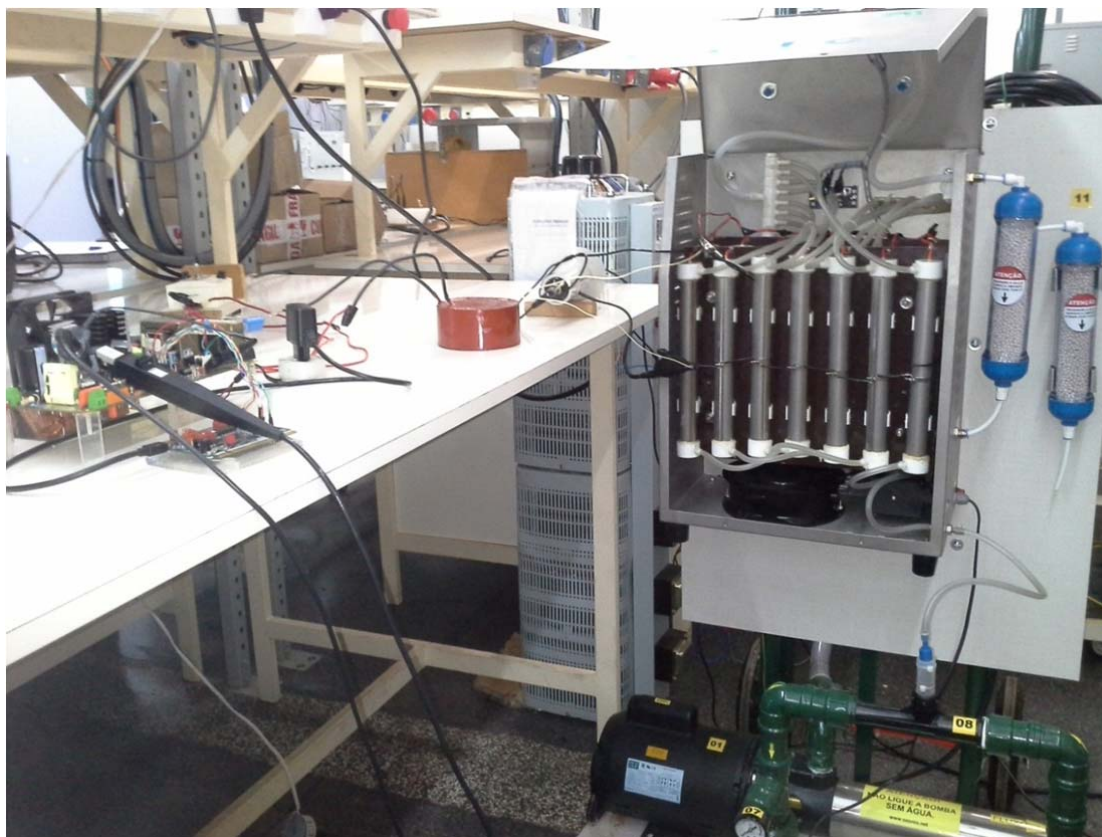
No próximo capítulo apresentam-se os detalhes da implementação prática e os resultados experimentais para a proposta.

---

## 4 IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais obtidos com o protótipo implementado, conforme ilustra a Figura 52. À direita da Figura 52 observam-se as câmaras para geração de ozônio, os filtros para reduzir a umidade do ar e o sistema de injeção do ozônio produzido em água, considerando-se um sistema de bombeamento. No centro da Figura 52, em cima da bancada, pode-se observar o transformador elevador (resinado em epóxi), e, à esquerda o conversor implementado com o sistema de condicionamento de sinais e controlador DSC utilizado.

Figura 52 – Conversor proposto para geração de ozônio em aplicações de limpeza industrial.



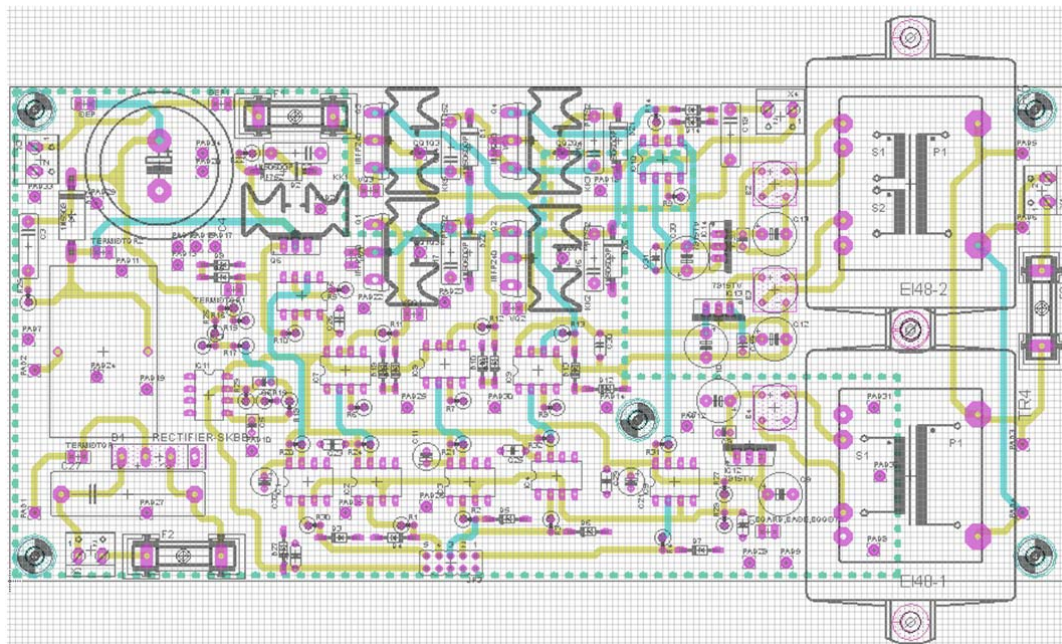
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 53 mostra a distribuição dos componentes elétricos no projeto da placa desenvolvida para o conversor proposto, destacando na parte esquerda o estágio retificador Boost com CFP, na parte superior central o inversor Full-bridge ressonante phase-shift, na



parte direita as fontes auxiliares de tensão e na parte central inferior o condicionamento de sinais analógicos e de PWM.

Figura 53 – Placa desenvolvida para o conversor proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor. EAGLE.

#### 4.1. Estágio de Entrada Boost

A Figura 54 mostra os dados de medições para o ponto de operação nominal do estágio de entrada Boost. De acordo com tais medições, observam-se o valor eficaz da tensão de entrada de 220V (medidor Yokogawa), a tensão média do barramento CC de saída do estágio Boost em 364,19V e uma corrente média de saída do estágio de entrada de 0,56A que representa uma carga de aproximadamente 200W, considerando-se o sistema em malha fechada de controle e regime permanente.

As formas de onda obtidas experimentalmente correspondem ao comportamento projetado e simulado na seção 3.1 para o estágio de entrada e serão apresentadas e discutidas a seguir.

A Figura 55 apresenta as tensões sobre o transistor Boost, durante o período da tensão de entrada de alimentação, assim como, a corrente no indutor Boost, verificando-se nesta última o seu formato senoidal retificado, onde os seus valores de pico para cada período de chaveamento seguem tal formato da tensão de alimentação de entrada (seguidor da tensão de entrada), de maneira semelhante ao obtido na simulação na parte inferior da Figura 23. A

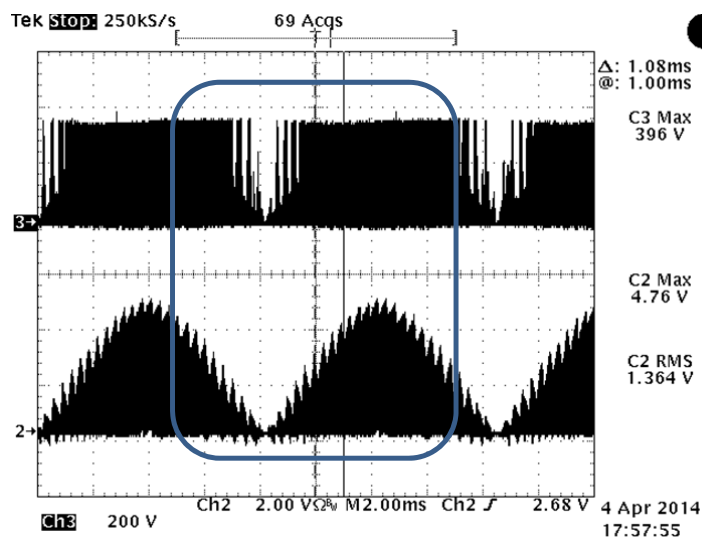
tensão máxima de bloqueio do transistor corresponde à tensão de saída no barramento CC do estágio Boost. Uma corrente máxima de 4,76A é atingida no indutor Boost, devido ao valor da indutância abaixo do valor para a condução crítica, uma vez que, quanto menor a indutância maior será o valor de pico desta corrente no modo de operação descontínuo.

Figura 54 – Tensão de entrada, tensão e corrente de saída do estágio Boost.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 55 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost.

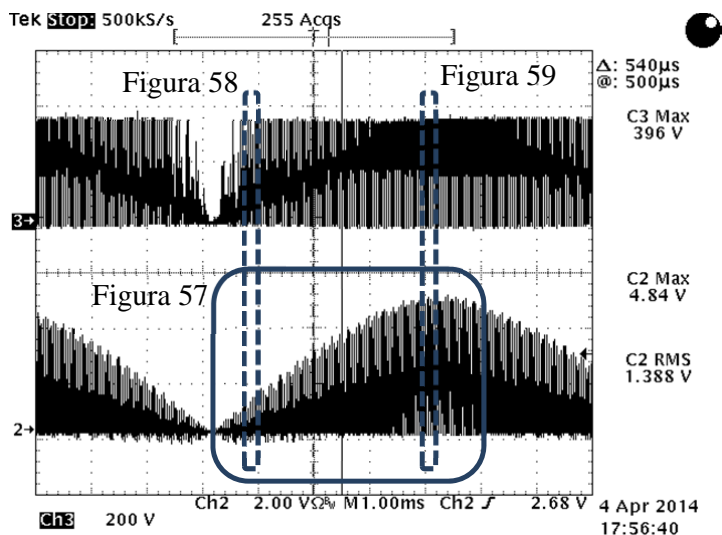


Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 56 mostra um maior detalhe da Figura 55, considerando-se ainda detalhes nas áreas destacadas, a partir das quais serão apresentadas maiores informações para a operação do estágio de entrada.

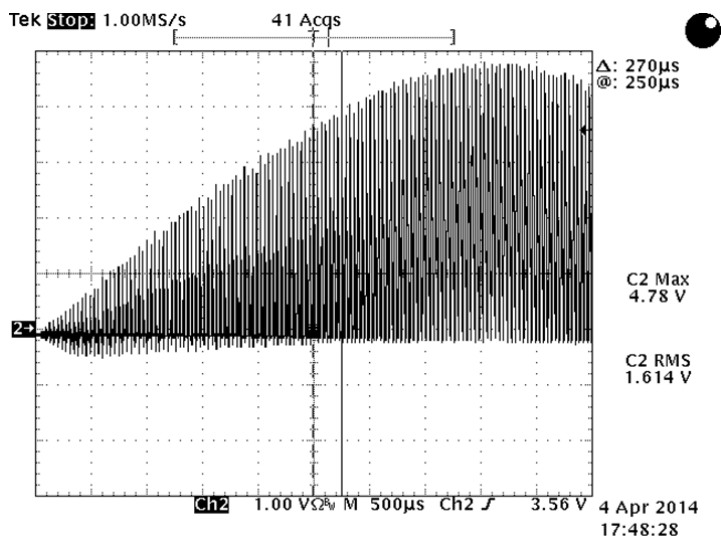
A Figura 57 mostra um maior detalhe da corrente descontínua no indutor boost em um quarto do período da rede, a partir do resultado apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Detalhe Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 57 – Corrente no indutor boost em um quarto do período da rede.

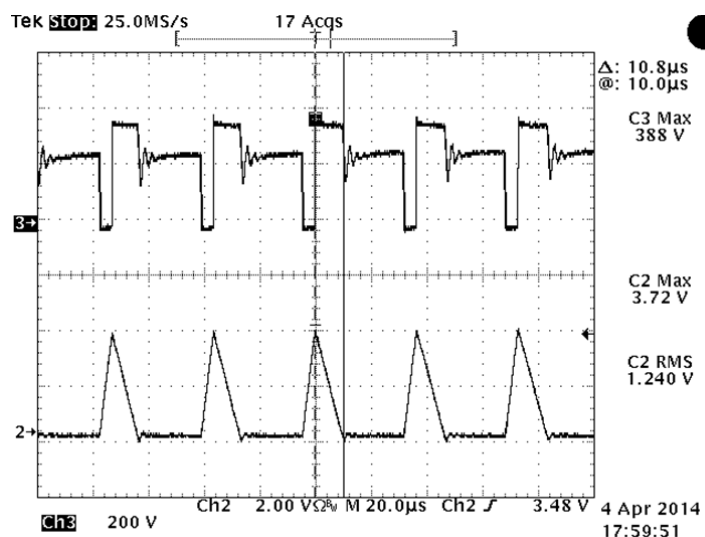


Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 58 mostra uma área de condução descontínua localizada próxima da região de tensão nula de entrada, onde é maior a descontinuidade da corrente no indutor Boost, de acordo com os resultados apresentados na Figura 58.

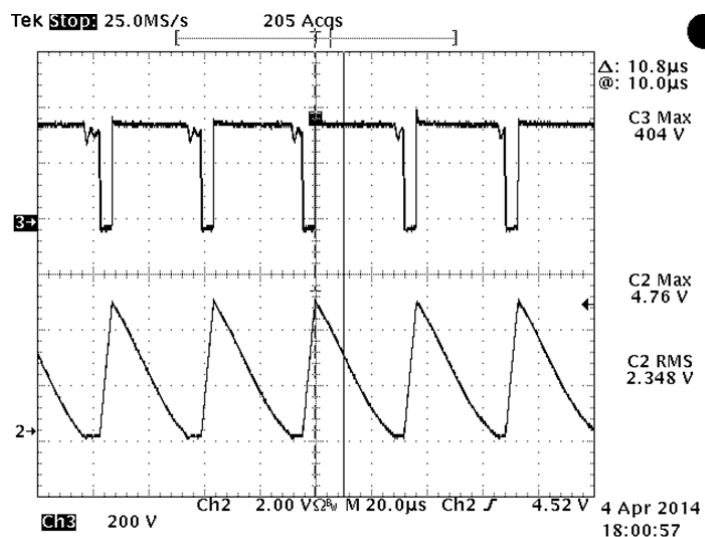
A Figura 59 mostra um detalhamento próximo do valor de pico da tensão de alimentação, a partir do resultado apresentado na Figura 58, onde a condução é quase crítica e a corrente no indutor Boost encontra-se em torno de seu valor máximo.

Figura 58 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost, detalhamento próximo da região de tensão nula de entrada.



Fonte: Dados experimentais do autor.

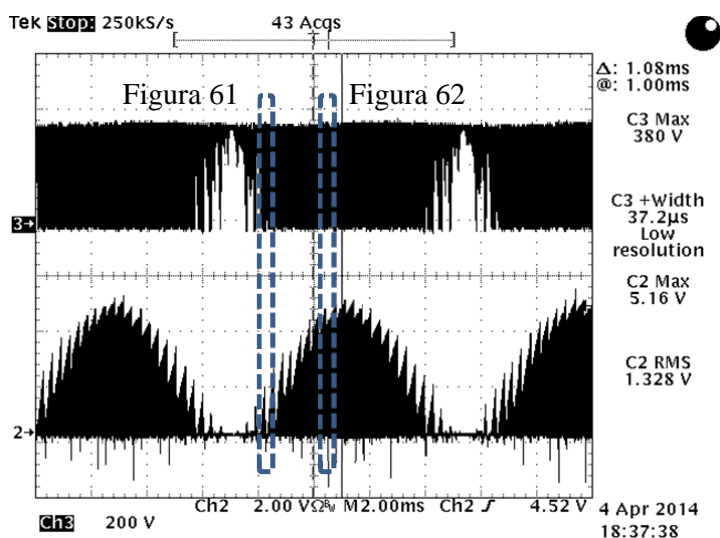
Figura 59 – Tensão no transistor Boost e corrente no indutor Boost, detalhamento em torno do valor de pico da tensão de alimentação.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 60 mostra as formas de onda de tensão e corrente no Diodo do estágio Boost, onde se verifica o valor máximo da tensão sobre o mesmo ( $-380\text{V}$ , considerando-se tensão reversa máxima de bloqueio), assim como, o valor de pico da corrente (em torno de  $5,16\text{A}$ ) através do mesmo.

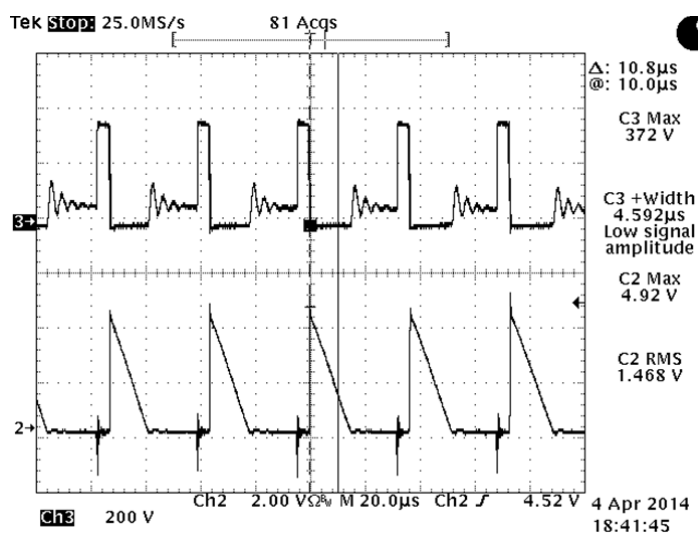
Figura 60 – Tensão e corrente no Diodo Boost.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Dois detalhes são apresentados a partir do resultado da Figura 60. A Figura 61 mostra o comportamento da corrente e tensão no diodo boost, em torno da região de tensão nula de entrada. O tempo de condução do diodo está relacionado com o tempo de descarga da energia armazenada no indutor Boost, região em que a tensão sobre o mesmo é praticamente nula.

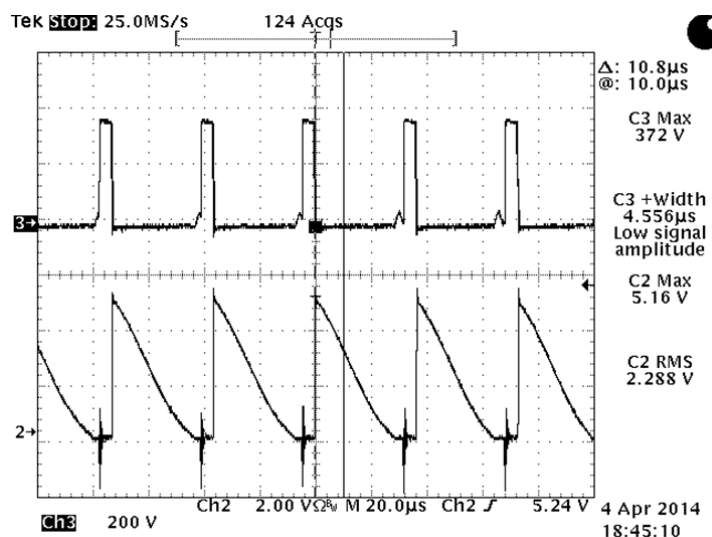
Figura 61 – Detalhe Tensão e corrente no Diodo Boost no MCD.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 62 mostra o comportamento da tensão e da corrente no diodo Boost, em torno da região do valor de pico da tensão de alimentação, onde o tempo de condução do diodo Boost encontra seu valor máximo.

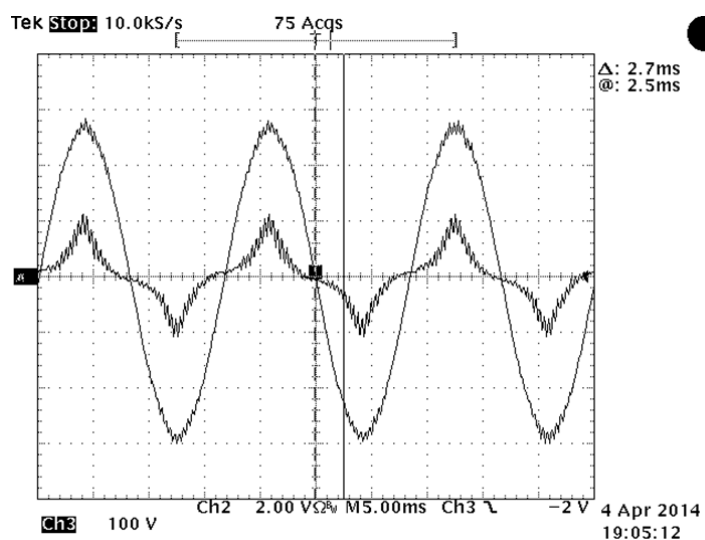
Figura 62 – Detalhe da Tensão e corrente no Diodo Boost, em torno da região do valor de pico da tensão de alimentação.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 63 apresenta a tensão e corrente de entrada do estágio Boost, conforme apresentado na Figura 16. Como já observado, considerando a aplicação com reduzido ganho para o estágio Boost, no MCD, a componente de terceira ordem harmônica é ainda elevada, contudo, atendendo plenamente os limites impostos pela IEC 61000-3-2 (classe D).

Figura 63 – Tensão e corrente de entrada do estágio Boost.

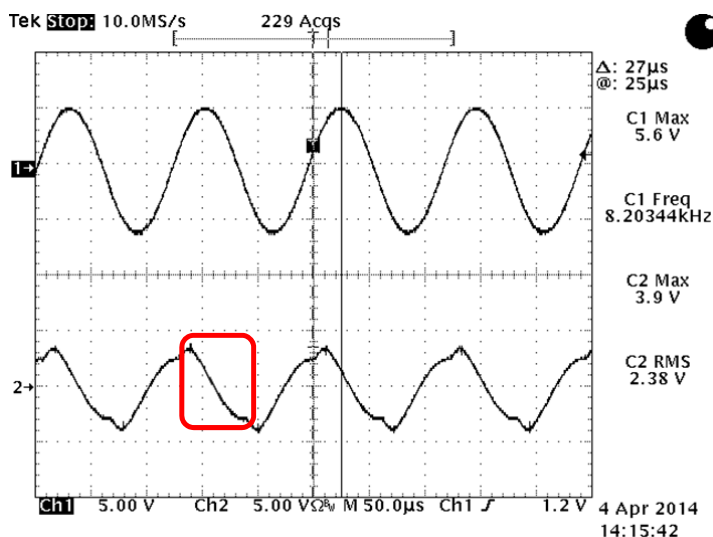


Fonte: Dados experimentais do autor.

## 4.2. Estágio de Saída

A Figura 64 mostra as formas de onda da tensão nas câmaras de descarga, de formato senoidal, com frequência de 8,2kHz e tensão pico de 5,6kV, junto com a corrente ressonante no primário do transformador, com formato quase senoidal e valor eficaz aproximadamente de 2,4A. Pode-se ainda observar a defasagem entre estas formas de onda, perto dos 90 graus, fato que garante as comutações não dissipativas para ambos os braços do estágio inversor, como apresentado anteriormente e como se verificará em detalhes a seguir. O nível de tensão atingido nas câmaras está de acordo com o projetado, sendo suficiente para a geração de ozônio nas câmaras de descarga, como se avaliará na sequência.

Figura 64 – Tensão nas câmaras de descarga e corrente ressonante no primário do transformador elevador.



Fonte: Dados experimentais do autor.

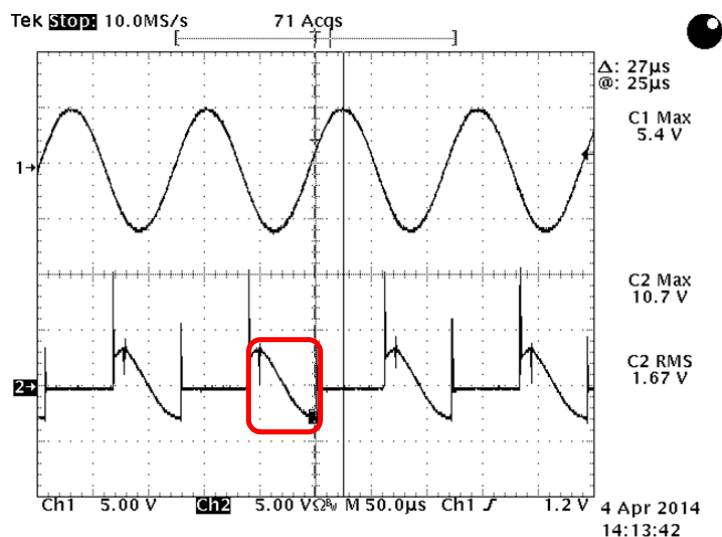
A Figura 65 apresenta a tensão aplicada no conjunto de câmaras de produção de ozônio e a corrente através do transistor S3 do braço com comutação ZCS. Conforme se pode observar na Figura 65, durante a inversão da corrente neste transistor, a qual circulará através de seu diodo intrínseco em antiparalelo, S3 é comanda para o bloqueio com corrente nula, ou seja, comutação do tipo ZCS.

A Figura 66 e a Figura 67 mostram detalhadamente a tensão e corrente na chave inferior esquerda S3 da ponte inversora, pertencente ao braço ZCS, onde a inversão de polaridade da corrente mostrada na parte inferior destas imagens, corresponde ao estado 1 da Figura 42,



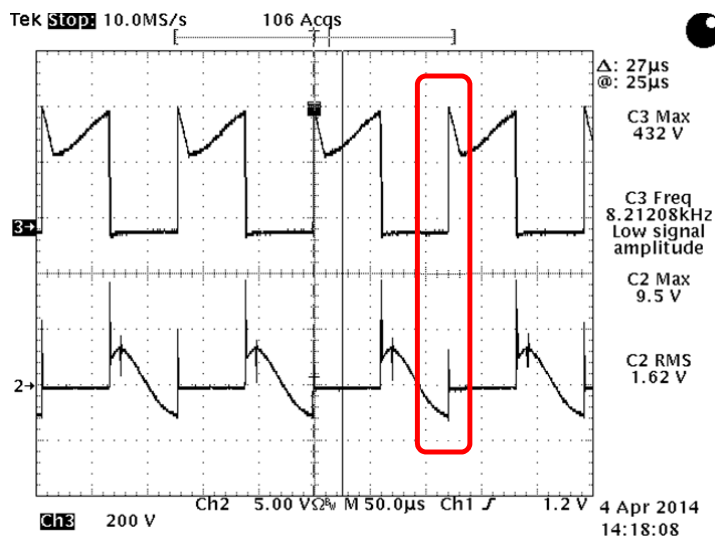
onde o bloqueio de S3 pode ser realizado com comutação não dissipativa e do tipo ZCS, devido a condução do diodo D3 em antiparalelo com S3.

Figura 65 – Tensão nas câmaras de descarga e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 66 – Tensão e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor.

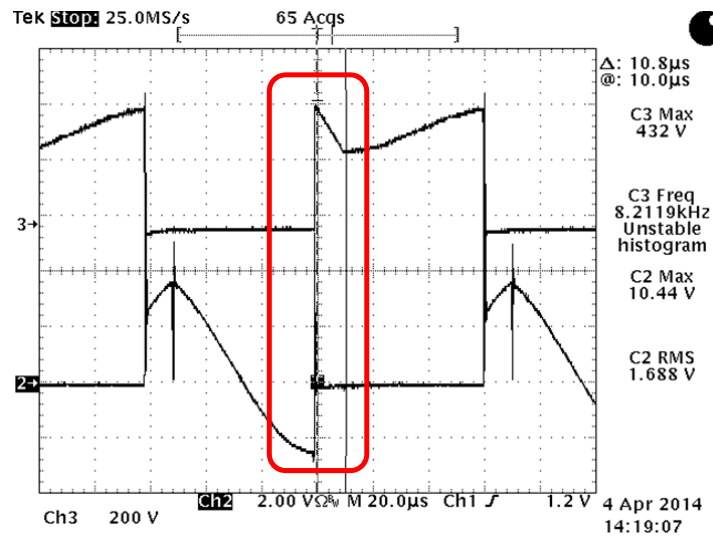


Fonte: Dados experimentais do autor.

A frequência de chaveamento é pouco maior que a frequência de ressonância, fato que garante uma ótima comutação ZVS e ZCS segundo Amjad (AMJAD, SALAM, 2013) e conforme aqui demonstrado.



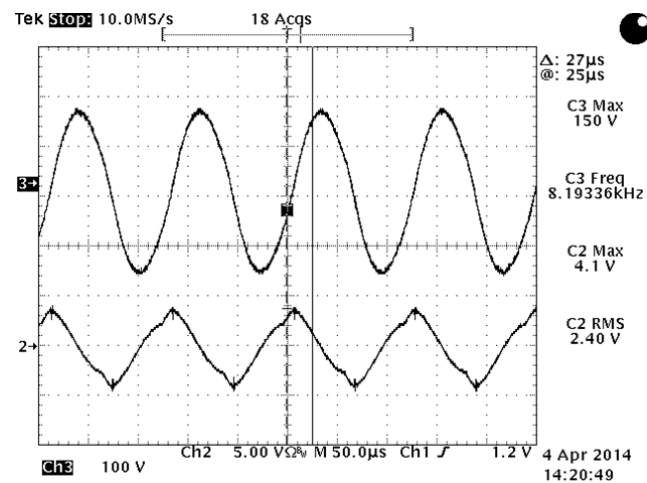
Figura 67 – Detalhe Tensão e corrente no transistor S3 do braço ZCS do estágio inversor.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 68 mostra as formas de onda da tensão no capacitor série ressonante  $C_R$  e a corrente de saída da ponte inversora (corrente no primário do transformador elevador). Pode-se observar a defasagem ressonante entre os sinais, onde para uma tensão zero no capacitor apresenta-se uma corrente máxima pelo primário do transformador e vice-versa.

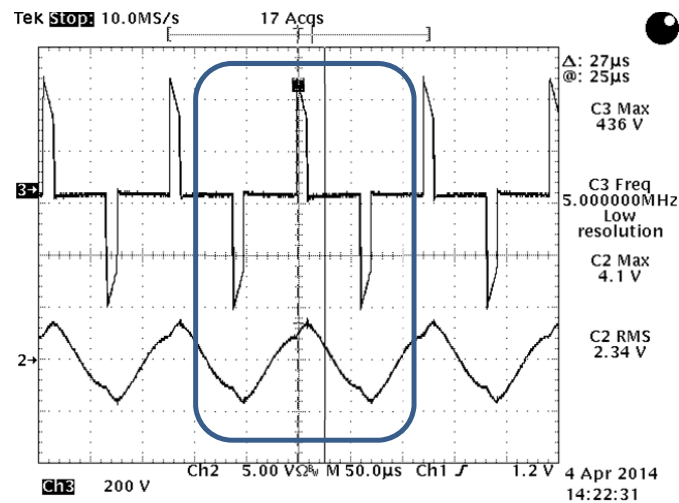
Figura 68 – Tensão no capacitor série  $C_R$  e corrente ressonante no primário do transformador elevador.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 69 e Figura 70 mostram a tensão  $V_{ab}$  de saída da ponte inversora e a sua correspondente corrente de saída ressonante. Pode-se verificar como em cada pulso positivo e negativo a corrente é reforçada de maneira progressiva e ressonante, segundo os estágios analisados nas Figura 41 e Figura 42.

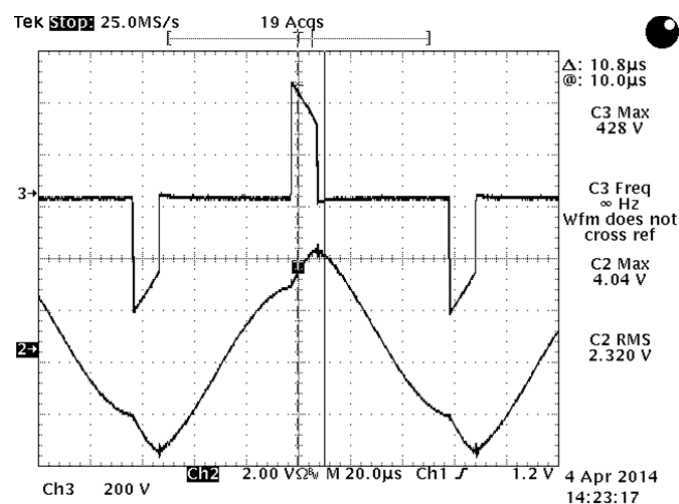
Figura 69 – Tensão  $V_{ab}$  de saída do estágio inversor e corrente ressonante.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 70 mostra um maior detalhe na relação entre a tensão  $V_{ab}$  de saída do estágio inversor e a corrente ressonante no primário do transformador elevador. Pode-se verificar com maior detalhe, nos pontos dos pulsos de tensão, o efeito amplificador da ressonância, onde cada pulso atua na região em que a corrente está chegando ao seu ponto de máximo valor ressonante.

Figura 70 – Tensão  $V_{ab}$  de saída do estágio inversor e corrente ressonante.

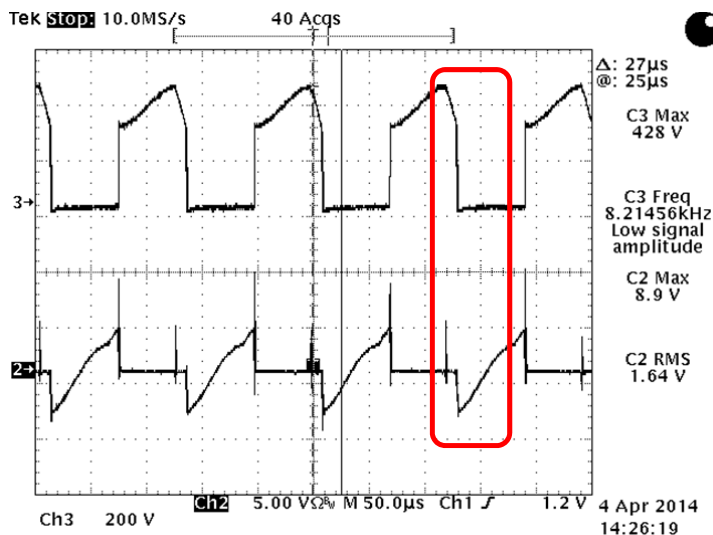


Fonte: Dados experimentais do autor.

As Figura 71 e Figura 72 mostram as formas de onda de tensão e corrente em uma das chaves do braço ZVS, chave S2, com a corrente invertendo a sua polaridade no estágio ressonante, levando a condução do diodo D2 em antiparalelo com S2. Portanto, durante a

inversão da corrente e condução de D2, S2 poderá ser colocada em condução com tensão nula, ou seja, com comutação do tipo ZVS.

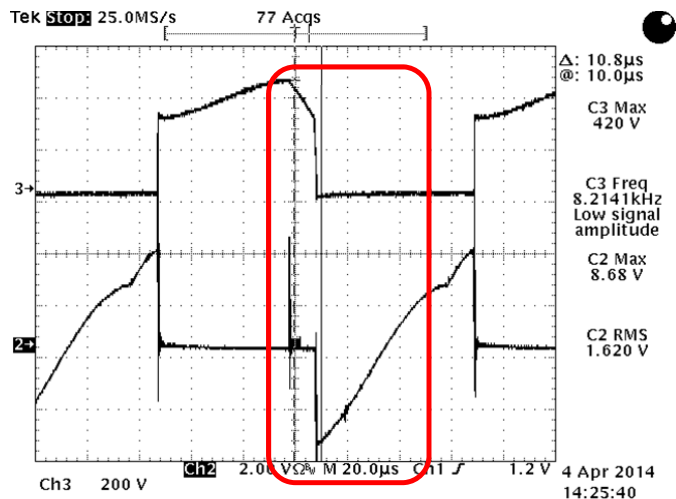
Figura 71 – Tensão e corrente em uma das chaves (S2) do braço ZVS do estágio inversor.



Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 72 mostra com maior detalhe o ponto de ocorrência da comutação com tensão zero ZVS, ou seja, quando a corrente torna-se positiva e o transistor S2 encontra-se habilitado previamente a conduzir, assume a condução com tensão nula (ZVS).

Figura 72 – Tensão e corrente em S2 do braço ZVS do estágio inversor.



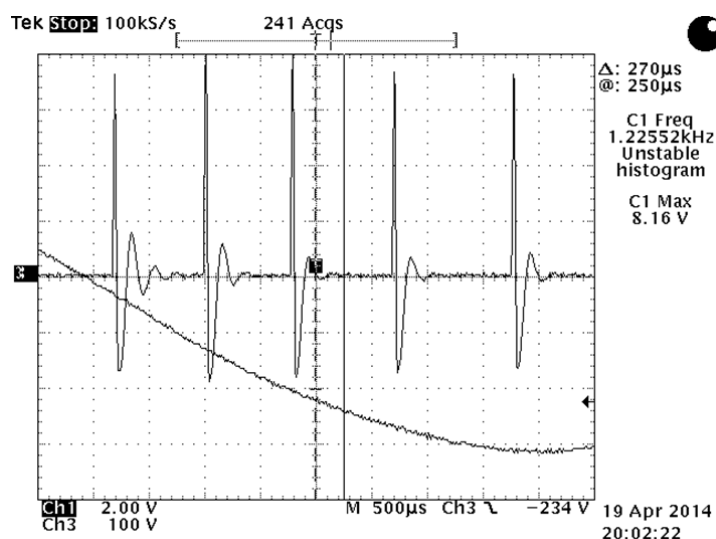
Fonte: Dados experimentais do autor.

### 4.3. Comparação entre as formas de onda da tensão de saída, aplicadas às câmaras de descarga

A Figura 73 e Figura 74 mostram as formas de onda da tensão de saída geradas para o conversor analisado como produto comercial e para o conversor proposto, respectivamente, num mesmo período de tempo e correspondente a 5ms.

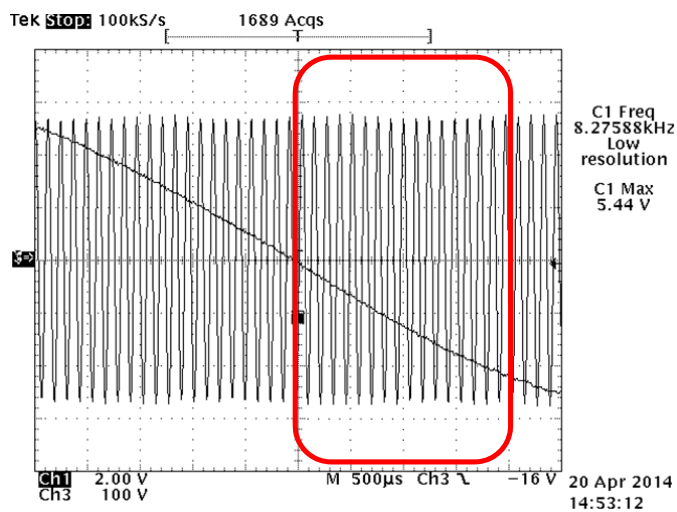
O conversor comercial apresenta apenas 5 pulsos de curta duração e uma tensão máxima de 8kV, conforme a Figura 73.

Figura 73 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial (em 5ms).



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 74 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido (em 5ms).



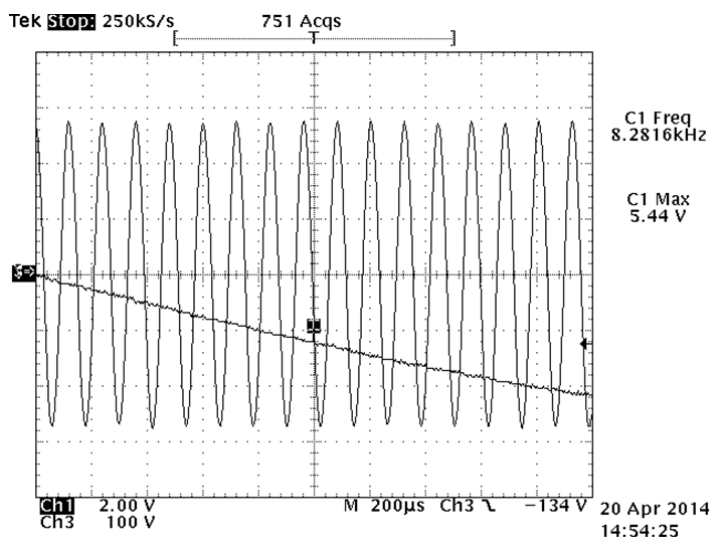
Fonte: Dados experimentais do autor.

Conforme se verifica na Figura 74, o conversor proposto e desenvolvido apresenta um maior número de pulsos, no mesmo período considerado, apesar de apresentar uma tensão máxima menor (em torno de 5,5kV e com amplitude máxima praticamente constante). Portanto, pode-se inferir destes resultados que o conversor proposto apresenta uma maior densidade de energia transferida às câmaras de descarga, o que levará à maior produção de ozônio, como se verificará na continuidade.

Em relação à densidade de energia transferida às câmaras de descarga, o menor nível de tensão obtido com o conversor desenvolvido é compensado com a frequência e o formato senoidal dos pulsos gerados (pulsos bipolares). No mesmo período de tempo de 5ms (500 $\mu$ s por divisão) são gerados aproximadamente 40 pulsos senoidais pelo conversor desenvolvido contra 5 pulsos pelo conversor comercial, conforme Figura 74 e Figura 74. Em termos da frequência dos pulsos de tensão, uma frequência maior e próxima a 8kHz é obtida no conversor proposto, em relação aos 1,25kHz obtidos pelo conversor comercial. A forma de onda da tensão de entrada de alimentação é apresentada nas imagens, como referência para as análises aqui apresentadas.

A Figura 75 mostra a ampliação da imagem no quadro vermelho da imagem da Figura 74, com a finalidade de se observar o formato bipolar da tensão de saída gerada pelo conversor desenvolvido.

Figura 75 – Detalhamento dos pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido.

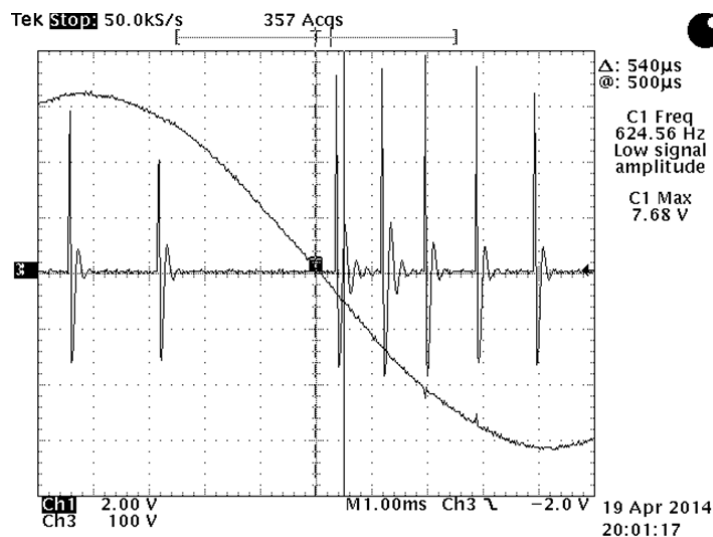


Fonte: Dados experimentais do autor.

A Figura 76 e Figura 77 mostram esta mesma comparação entre as formas de tensão geradas, agora em um espaço de tempo maior (10ms), onde pode-se verificar a uniformidade

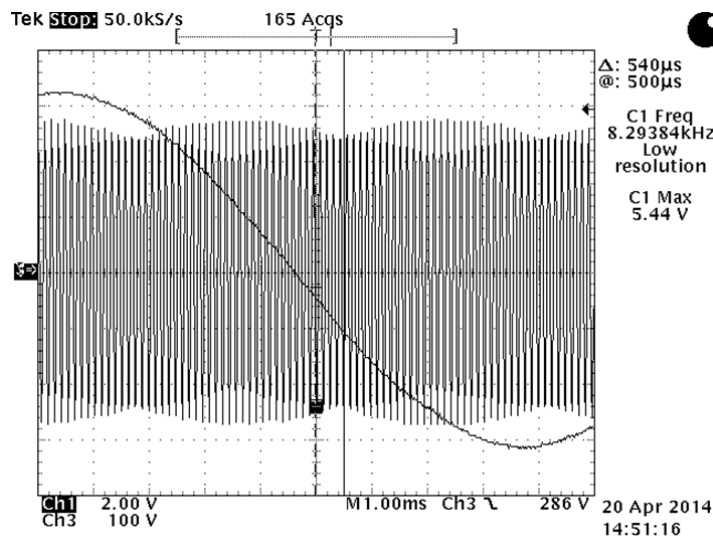
dos pulsos gerados pelo conversor desenvolvido e o padrão dos pulsos no conversor comercial. Como já observado, o padrão de pulsos do produto comercial não é totalmente periódico e apresenta uma maior concentração ou frequência de pulsos no começo de cada semiciclo da tensão da rede de alimentação. Vale destacar mais uma vez que a parte negativa dos pulsos gerados pelo conversor comercial é menor em relação aos pulsos positivos, resultando em uma menor energia transferida em cada pulso bipolar e assim uma menor geração de ozônio.

Figura 76 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor comercial (10ms).



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 77 – Pulsos de tensão gerados pelo conversor desenvolvido (10ms).



Fonte: Dados experimentais do autor.

Entretanto, na Figura 74, para o conversor proposto, observa-se a uniformidade dos pulsos positivos e negativos em relação às suas amplitudes máximas, praticamente constantes. A oscilação observada é decorrente da ondulação da tensão no barramento CC de saída do estágio retificador Boost.

#### 4.4. Medições experimentais de produção de ozônio

A Figura 78 mostra o local onde foram realizados os testes de produção de ozônio (para o produto comercial e o desenvolvido) injetado em água. Inicialmente foram realizados os testes para a medição experimental da concentração de ozônio residual produzida pelo conversor comercial em sua operação normal, considerando-se um mesmo fluxo de água tanto para os testes do produto comercial, quanto para o conversor desenvolvido.

Figura 78 – Local dos testes de produção de ozônio injetado em água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 79 mostra o kit de testes pronto para a sua utilização, onde no primeiro tubo deve ser coletado 5ml de água ozonizada a partir do equipamento comercial, logo acrescentado 5ml de água deionizada incluída no kit e finalmente adicionando o reagente químico do kit, agitando a mistura durante uns 10 segundos. Após isto é coletado no segundo tubo 10ml de somente água ozonizada produzida pelo equipamento comercial. A água com o reagente resultará em uma coloração rosa que a partir de uma comparação com uma escala variável de coloração rosa é determinada a concentração de ozônio residual presente na água em mg/l, conforme se observa na Figura 79.

Figura 79 – Kit para a medição de ozônio residual dissolvido em água (teste de colorimetria).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o conversor comercial foram realizados mais de 5 testes em diferentes momentos do processo contínuo de geração de ozônio. A Figura 80 mostra o melhor dos resultados obtidos, onde uma concentração residual de 0,2mg de ozônio em cada litro de água foi obtida, no melhor dos casos, conforme se pode observar no visor do medidor. A Figura 83 mostra o detalhe dos dados obtidos em 5 amostras analisadas para a comparação de resultados, tanto para o produto comercial, quanto para o proposto.

Figura 80 – Máxima concentração de ozônio obtida com o conversor comercial.



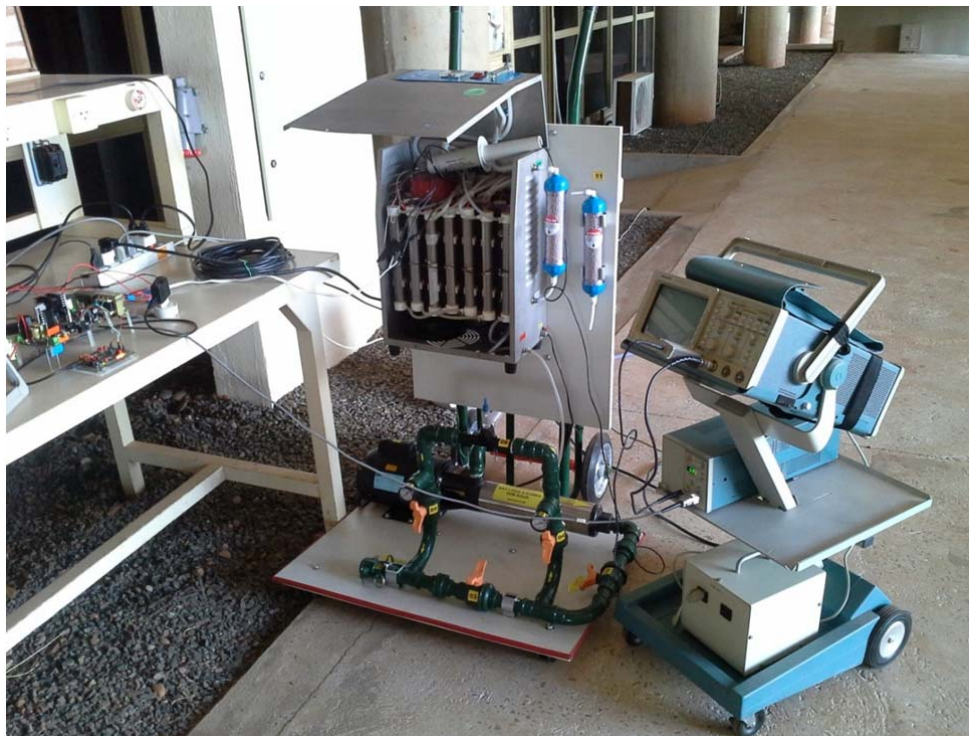
Fonte: Dados experimentais do autor.

O local dos testes com o conversor desenvolvido é mostrado na Figura 81. O equipamento foi ligado até se obter um ponto de operação estável. Logo após, nas mesmas condições de fluxo de água e ar pelo sistema, como nos testes com o produto comercial, foram coletadas as amostras de água ozonizada com o uso do conversor proposto. O



procedimento foi repetido múltiplas vezes, tomando-se as últimas 5 amostras para o experimento de comparação.

Figura 81 – Local dos testes com o conversor desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 82 mostra a maior das concentrações medidas nos testes com o conversor desenvolvido. Visualmente e rapidamente pode-se verificar a maior concentração obtida com o conversor proposto, uma vez que a coloração ou intensidade da cor rosa agora conseguida é bem maior do que no caso anterior, com o produto comercial. Onde a intensidade da cor conseguida após a reação química dos reagentes é proporcional à concentração de ozônio presente na água de saída do sistema. Assim, uma concentração máxima de 0,5 mg/l foi obtida com o novo conversor proposto, conforme se observa na imagem à direita da Figura 79.

Como apresentado, foram realizados 5 testes oficiais para cada equipamento, o comercial e o desenvolvido, com o objetivo de se obter uma boa comparação dos níveis de ozônio residual em água produzidos por cada equipamento.

Observa-se que o kit de medição tem uma resolução de 0,1 mg/l, mesmo tendo uma escala contínua de graduação da cor de comparação.

Figura 82 – Máxima concentração de ozônio obtida com o conversor desenvolvido.

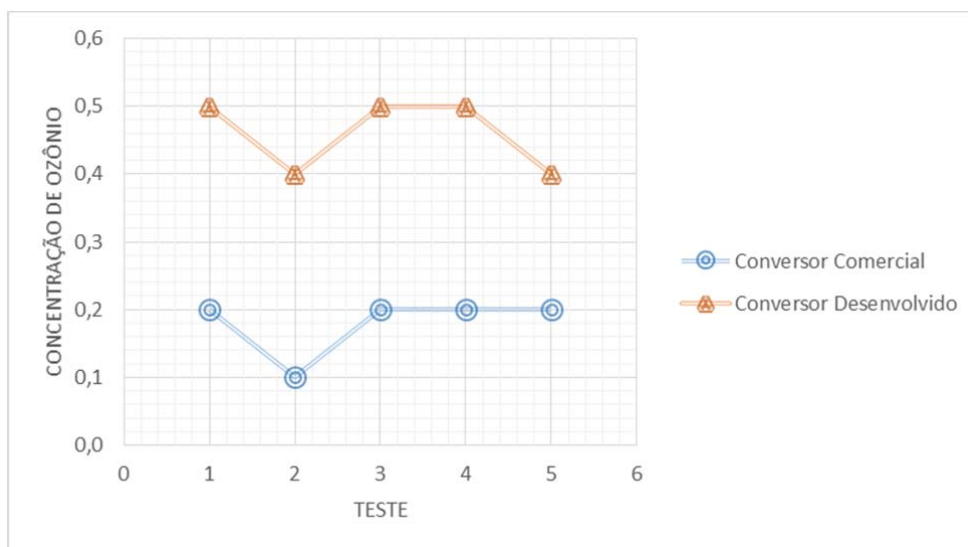


Fonte: Dados experimentais do autor.

Portanto, e, finalmente, a Figura 83 mostra a comparação gráfica da concentração de ozônio produzido para as amostras dos diferentes testes.

Desta forma, pode-se concluir que o conversor comercial levou à produção de ozônio com uma concentração média de 0,18 mg/l e com o conversor proposto e desenvolvido foi possível obter uma concentração média de 0,46 mg/l, aproximadamente 3 (três) vezes maior.

Figura 83 – Concentração de Ozônio (mg/l) na água produzida para os testes comparativos.



Fonte: Dados experimentais do autor.

#### 4.5. Conclusões

O estágio boost de entrada cumpre satisfatoriamente o seu objetivo de obter um barramento em Corrente Contínua (CC) regulado que, atuando como seguidor de tensão da

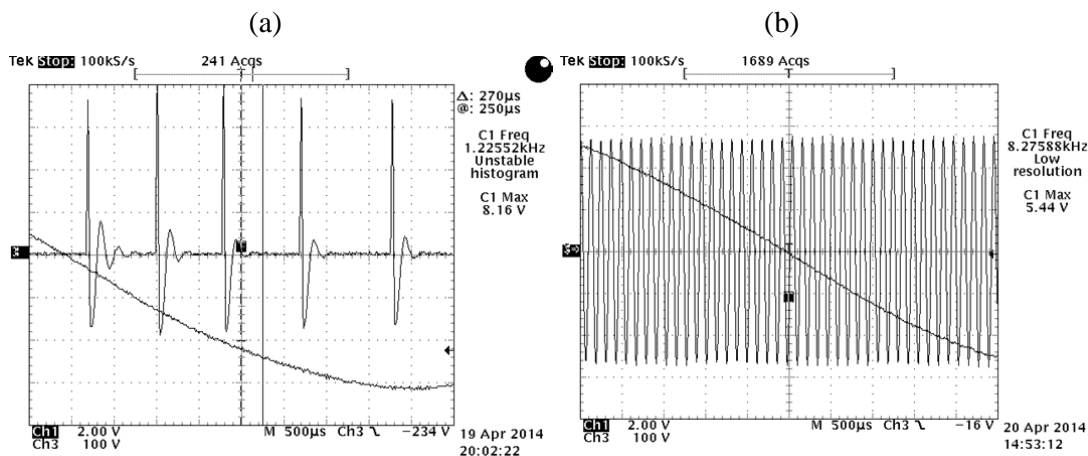
entrada, apresenta um elevado fator de potência com reduzida distorção harmônica para a corrente de entrada.

A operação em uma frequência de chaveamento levemente superior à frequência de ressonância garante a correta operação e comutações ZCS e ZVS nos braços da ponte inversora de saída, considerando-se controle por deslocamento de fase e modulação bipolar.

O circuito ressonante implementado consegue gerar tensões necessárias de alta tensão e alta frequência, ótimas para a geração de ozônio nas câmaras de descarga. Além deste fato, consegue-se obter melhores tensões em relação às geradas inicialmente pelo conversor comercial, com uniformidade dos seus valores de pico bipolares, garantindo uma operação ressonante e uma operação ZCS e ZVS de baixa dissipação de energia na ponte inversora de saída.

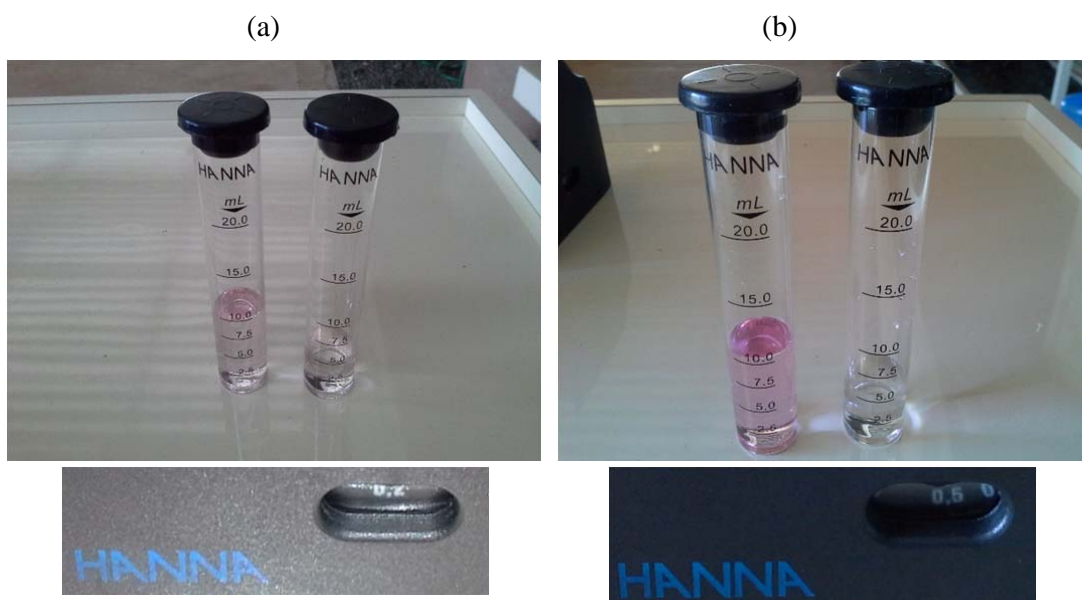
Portanto, em relação às formas de onda de tensão de saída geradas pelos conversores, conforme Figura 84, considerando as suas tensões máximas, frequência dos pulsos, formato dos pulsos, uniformidade da bipolaridade, conclui-se que os pulsos gerados pelo conversor proposto desenvolvido neste trabalho resultam em uma maior transferência de energia às câmaras de descargas, fato que leva a uma maior produção de ozônio residual, segundo comprovações apresentadas nos testes experimentais e maiores detalhes dos mesmos na Figura 85.

Figura 84 – Comparação pulsos de tensão gerados: (a) produto comercial e (b) conversor proposto.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Figura 85 – Comparação concentração de ozônio residual: (a) produto comercial e (b) conversor proposto.



Fonte: Dados experimentais do autor.

---

## 5 CONCLUSÕES GERAIS E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

O conversor ressonante implementado consegue gerar tensões de elevada tensão e elevada frequência, necessárias para a geração de ozônio através do emprego de câmaras de descarga. O ozônio gerado é injetado em água e através de um conjunto motor-compressor permite sua utilização (água ozonizada) em processos de limpeza e higienização industrial.

O estágio retificador boost de entrada atende o objetivo de impor uma corrente de entrada com reduzidas distorções harmônicas, resultando num elevado fator de potência para a estrutura proposta, com simplicidade e baixo custo de implementação.

Os resultados experimentais demonstraram que com o conversor proposto foi possível gerar pulsos de maior frequência (pouco maior que 8kHz), com maior uniformidade bipolar, devido ao formato quase senoidal próprio do comportamento do estágio de saída inversor ressonante, com valores de pico uniformes e próximos a 5,6kV, fatos que resultaram em uma maior produção de ozônio.

Em relação às formas de onda de tensão de saída geradas pelos conversores e considerando as suas tensões máximas, frequência dos pulsos, formato dos pulsos, uniformidade da bipolaridade, conclui-se que os pulsos gerados pelo conversor proposto e desenvolvido representam uma maior transferência de energia às câmaras de descargas, fato que levou a uma maior produção de ozônio residual, conforme comprovações experimentais apresentadas.

A operação do estágio inversor de saída com frequência de chaveamento constante, pouco superior à frequência de ressonância, garante a correta operação e comutações não dissipativas dos interruptores deste estágio, assim como, permite elevada eficiência na produção de ozônio nas câmaras de descarga, considerando-se as tensões bipolares (bidirecionais), em relação às estruturas dos pulsadores convencionais para produção de ozônio, conforme observado para o produto comercial.

Com a ligação elétrica das câmaras em paralelo, ou seja, todas as câmaras ligadas em paralelo e alimentadas por um único conversor proposto, com a maior frequência dos pulsos de tensão, com maior uniformidade na bipolaridade dos pulsos de alta tensão, também resultou em fator positivo para o aumento da concentração de ozônio residual, em comparação com o produzido com o conversor comercial.

---

---

Finalmente, conforme resultados apresentados na Figura 83, com o conversor comercial foi obtida uma concentração média de ozônio de 0,18 mg/l e com o conversor proposto e desenvolvido foi obtida uma concentração média de 0,46 mg/l, podendo-se concluir que o conversor proposto permite produzir uma maior concentração de ozônio residual em água, em relação ao produto comercial testado, demonstrando que poderá resultar em melhor eficiência para sua destinação final em processos de higienização e limpeza/lavagem industrial, ou seja, maior ação germicida e bactericida esperada.

Como proposta de continuidade para a pesquisa, considerando-se que o método industrial mais comum e efetivo para a geração de ozônio é o método da descarga corona, propõe-se a evolução do conversor utilizando-se:

- (a) Um estágio de entrada de menor custo e maior fator de potência;
  - (b) Um estágio de saída com inversor ressonante, comando por deslocamento de fase e modulação bipolar, com transformador elevador de maior ganho e maior frequência de operação.
-

---

## REFERÊNCIAS

ELECTRONIC SHOP. *Há 24 anos fabricando geradores de Ozônio*. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://bel92.wix.com/ozonic>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

3G/H QUARTZ. *Tube ozone generator for water treatment, ozonator for water purifier, ozonizer for water treatment*. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <<http://www.made-in-china.com/showroom/vivachou/product-detailbKlmmEXBHAWv/China-3G-H-Quartz-Tube-Ozone-Generator-for-Water-Treatment-Ozonator-for-Water-Purifier-Ozonizer-for-Water-Treatment.html>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

A.T. EXPORT S.A. NORMATIVA. *Y el ozono: informe sobre el ozono como desinfectante, su uso en el aire y las Normativas y Usos y Costumbres*. [S. l.], 2003. Acesso em: 28 out. 2013.

AIR LIQUIDE. *Air liquide gas encyclopedia*. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=137>>. Acesso em: 21 out. 2013.

ALONSO, J. M.; CARDESÍN, J.; LOPEZ COROMINAS, E.; RICO-SECADES, M.; GARCÍA, J. Low-Power High-Voltage High-Frequency Power Supply for Ozone Generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 40, n. 2, p. 414, 2004.

ALONSO, J. M.; ORDIZ, C.; DALLA COSTA, M. A.; RIBAS, J.; CARDESÍN, J. High-Voltage Power Supply for Ozone Generation Based on Piezoelectric Transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 45, n. 4, , p. 1513, 2009.

AMJAD, M.; SALAM, Z. Analysis, design, and implementation of multiple parallel ozone chambers for high flow rate. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Piscataway, v. 61, n. 2, p. 753-765, 2013.

BARRON, A. R. *Ozone, chemistry of the main group elements*. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <<http://cnx.org/content/m33089/latest/?collection=col11124/latest>>. Acesso em: 21 out. 2013.

BIOWELL INFECTION CONTROL. [S. l. : s. n.], 2013. Site. Disponível em: <[http://biowellozone.com/ozone\\_generator.html](http://biowellozone.com/ozone_generator.html)>. Acesso em: 23 out. 2013.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Review of the California Ambient Air Quality Standard for ozone*. [S. l.], 2005. Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/regact/ozone05/isorv2.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2013.

CANESIN, C. A. *Fontes chaveadas*. Ilha Solteira: UNESP, 2013.

CHALMERS, I. D.; ZANELLA, L.; MACGREGOR, S. J. Ozone generation using pulsed corona in a wirekyliner arrangement. *The Institution of Electrical Engineers*, Stevenage, v. 7, p. 1-5, 1996.

---

---

CHAO, S.; ZHIQIANG, M.; YANDONG, C. Development of a soft-switching power supply for ozone generation based on phase-shifted control. *Procedia Engineering*, Amsterdam, v. 23, p. 690-694, 2011.

CHEN, J.; WANG, P. Effect of relative humidity on electron distribution and ozone production by DC Coronas in air. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Piscataway, v. 33, n. 2, p. 808-812, 2005.

COHEN, N. *Understanding dissolved ozone and its use in pharmaceutical water systems*. Tampa: Pharmaceutical Engineering, 2013.

DORSEY, J. A.; DAVIDSON, J. H. *Ozone production in electrostatic air cleaners with contaminated electrodes*. Piscataway: IEEE, 1992.

DROPPO, J. G. Field determinations of hvdc ozone production rates. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, v. PAS-100, n. 2, p. 655-661, 1981.

DUMLER, K.; HANLEY, Q. S.; BAKER, C.; LUCHEL, D. L.; ALTMAN, L. C.; KOENIG, J. Q. The effects of ozone exposure on lactate dehydrogenase release from human and primate respiratory epithelial cells. *Toxicology Letters*, Shannon, v. 70, n. 2, p. 203-209. 1994.

EAST STROUDSBURG UNIVERSITY. *Atmospheric ozone and ozone depletion*. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://www.esu.edu/~scady/parise/3reactions.htm>>. Acesso em: 21 out. 2013.

ENVIRONMENTAL HEALTH. Department of Health, NSW. *Policy directive: ozone generators used for the purpose of indoor air cleaning*. Canberra, 2005. Disponível em: <[http://www0.health.nsw.gov.au/policies/pd/2005/pdf/PD2005\\_629.pdf](http://www0.health.nsw.gov.au/policies/pd/2005/pdf/PD2005_629.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2013.

ERICKSON, R. W. *Fundamentals of power electronics*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.

FUKAWA, F.; SHIMOMURA, N.; YANO, T.; YAMANAKA, S.; TERANISHI, K.; AKIYAMA, H. Application of nanosecond pulsed power to ozone production by streamer corona. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Piscataway, v. 36, n. 5, p. 2592-2597, 2008.

FUKAWA, F.; TOGO, H.; SHIMOMURA, N. *Consideration of parallel reactors for ozone production using nanosecond pulsed power discharge*. Piscataway: IEEE, 2004.

GAVA, A. J. *Tecnologia de alimentos*. São Paulo: Nobel, 2009.

UNIVERSITY OF EDINBURGH. Health and Safety Department. *Photocopiers and laser printers health hazards*. Edinburgh, 2010. Disponível em: <<http://www.docs.csg.ed.ac.uk/Safety/general/photocopiers.pdf>> Acesso em: 23 out. 2013.

---



- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. *Ozone: health hazards and precautionary measures*. Guidance Note EH38. [S. 1.], 1996. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh38.pdf>> Acesso em: 23 out. 2013.
- HONN, K. V.; GLEZMAN, G. M.; CHAVIN, W. A High capacity ozone generator for use in aquaculture and water processing. *Marine Biology*, Heidelberg, v. 34, p. 211-216, 1976.
- HOSSELET, L. M. Increased efficiency of ozone-production by electric discharges. *Electrochimica Acta, Kidlington*, v. 18, p. 1033-1041, 1973.
- HOSTACHY, J. C.; SERFASS, R. *Ozone bleaching: state of the art and new developments*. Herford: Wedeco, 2009. Disponível em: <<http://www.otsil.net/articles/ozone%20bleaching%20State%20of%20Art%20TECHNOLOGY%20.pdf>> Acesso em: 23 out. 2013.
- HOTHONGKHAM, P.; KONGKACHAT, S.; THODSAPORN, N. *Analysis and comparison study of PWM and phase-shifted PWM full-bridge inverter fed high-voltage high-frequency ozone generator*. Piscataway: IEEE PEDS, 2011.
- HOTHONGKHAM, P.; KONGKACHAT, S.; THODSAPORN, N. *Performance comparison of PWM and phase-shifted PWM inverter fed high-voltage high-frequency ozone generator*. Piscataway: IEEE TENCON, 2011.
- JACOB, D. J. *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- JENEI, I.; KISS, E. Development of the ozone generation by the variation of auxiliary electrodes. *Journal of Electrostatics*, Amsterdam, v. 63, p. 985–991, 2005.
- KETKAEW, S. The case study of 5 kHz – 25 kHz high frequency adjustment in converter circuit to generate ozone gas. *AU Journal of Technology*, Bangkok, v. 11, n. 1, p. 42-47, 2007.
- KIM, J. G.; YOUSEF, A. E.; KHADRE, M. A. Ozone and its current and future application in the food industry. *Advances in Food and Nutrition Research*, Maryland Heights, v. 45, p. 167-218, 2003.
- KINNARES, V.; HOTHONGKHAM, P. Circuit analysis and modeling of a phase-shifted pulsewidth modulation full-bridge-inverter-fed ozone generator with constant applied electrode voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Piscataway, v 25, n. 7, 1739, 2010.
- LESTAN, D.; HANC, A.; FINZGAR, N. Influence of ozonation on extractability of Pb and Zn from contaminated soils. *Chemosphere*, Kidlington, v. 61, n. 7, p. 1012–1019, 2005.
- LOWDON, E. *Practical transformer design handbook*. Sutton: McGraw-Hill, 1988.
- MABUCHI, R.; NAKATA, Y.; KAGEYAMA, T.; TERANISHI, K.; SHIMOMURA, N. *Investigation of ozone production using nanosecond pulsed power to increase ozone concentration*. Piscataway: IEEE, 2012.

---

MAGARA, Y.; ITOH, M.; MORIOKA, T. Application of ozone to water treatment and power. *Progress in nuclear Energy*, Philadelphia, v. 29, p. 175-182, 1995.

MOHAMED G, M. Biochemical basis of ozone toxicity. *Free Radical Biology and Medicine*, Philadelphia, v. 9, p. 245-265, 1990.

MONTECALVO, J.; WILLIAMS, D. *Application of ozonation in sanitizing vegetable process washwaters*. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2003.

Disponível em:

<[http://web.archive.org/web/20080528140629/http://www.cwtozone.com/files/articles/Food\\_Produce/Article%20-%20Veg.%20Process%20washwater.pdf](http://web.archive.org/web/20080528140629/http://www.cwtozone.com/files/articles/Food_Produce/Article%20-%20Veg.%20Process%20washwater.pdf)> Acesso em: 24 de out. 2013.

MORDECAI B. RUBIN,. The history of ozone. Iv. The isolation of pure ozone and determination of its physical properties (1). *Bulletin for the History of Chemistry*, Washington, v. 29, n. 2, p. 99-106, 2004.

NAKATA, Y.; MABUCHI, R.; TERANISHI, K.; SHIMOMURA, N. *Effect of small-diameter coaxial reactors on ozone production using nanosecond pulsed power*. Piscataway: IEEE, 2013.

NASA. *SOLVE II Science Implementation*. [S. l.], 2002. Disponível em:

<<https://www.espo.nasa.gov/solveII/implement.html>> Acesso em: 21 de out. 2013.

NILSSON, J. O.; ENINGER, J. E. Numerical modeling of ozone production in a pulsed homogeneous discharge: a parameter study. *IEEE transactions on plasma science*, Piscataway, v. 25, n. 1, p. 73-82, 1997.

PLASMAFIRE INTL. *The story of ozone*. Langley, 2012. Disponível em:

<<http://www.taksuhealinghaven.com/wp-content/uploads/2012/08/The-Story-of-Ozone.pdf>>. Acesso em: 23 de out. 2013.

PRIMOZONE. *Primozone is redefining ozone technology with its cold plasma ozone generators*. Sweden, 2012. Disponível em: <<http://www.primozone.com/ozone-technology#.UmgXQnBLPgc>>. Acesso em: 23 de out. 2013.

RILIZE. *Informe del ozono*. [S. l.], 2011. Disponível em Site web de Rilize:

<<http://www.rilize.com/OZONO%20RILIZE.pdf>>. Acesso em: 23 de out. 2013.

SAMARANAYAKE, W. J.; MIYAHARA, Y.; NAMIHIRA, T.; KATSUKI, S.; HACKAM, R.; AKIYAMA, H. *Ozone production by pulsed power in dry air*. Piscataway: IEEE, 1999.

SAMARANAYAKE, W. J.; MIYAHARA, Y.; NAMIHIRA, T.; KATSUKI, S.; HACKAM, R.; AKIYAMA, H. Ozone production using cylindrical reactors with and without solid dielectric layers in dry air. In: CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 1., 1999, Austin. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 1999. P. 379-382.

---

- SAMARANAYAKE, W. J.; MIYAHARA, Y.; NAMIHIRA, T.; KATSUKI, S.; HACKAM, R.; AKIYAMA, H. Ozone production using pulsed dielectric barrier discharge in oxygen. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Piscataway, v. 7, n. 6, p. 849-854, 2000.
- SAMARANAYAKE, W. J.; MIYAHARA, Y.; NAMIHIRA, T.; KATSUKI, S.; HACKAM, R.; AKIYAMA, H. Pulsed power production of ozone in  $O_2/N_2$  in a coaxial reactor without dielectric layer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Piscataway, v. 8, n. 5, p. 826-831, 2001.
- SAMARANAYAKE, W. J.; MIYAHARA, Y.; NAMIHIRA, T.; KATSUKI, S.; SAKUGAWA, T.; HACKAM, R.; ET AL. Pulsed streamer discharge characteristics of ozone production in dry air. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 254-260, 2000.
- SANTIAGO, E. B. *Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua*. 2005. 151 f. Tesis (Maestría en Ciencias En Ingeniería Mecatrónica) - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, 2005.
- SHIMOMURA, N.; WAKIMOTO, M.; TOGO, H.; NAMIHIRA, T.; AKIYAMA, H. *Production of ozone using nanosecond short pulsed power*. Piscataway: IEEE, 2003.
- STANLEY, B. T. *Electrolytic ozone generation and its application in pure water systems*. Duebendorf: [s. n.], 2003. Disponível em: <[http://www.degremont-technologies.com/IMG/pdf/tech\\_ozonia\\_pure\\_water.pdf](http://www.degremont-technologies.com/IMG/pdf/tech_ozonia_pure_water.pdf)>. Acesso em: 23 de out. 2013.
- SUMMERFELT, S. T.; HOCHHEIMER, J. N. Review of ozone processes and applications as an oxidizing agent in aquaculture. *The Progressive Fish-Culturist*, Philadelphia, v. 59, p. 94-105, 1997.
- SUNG, T. L.; TEII, S.; LIU, C. M.; HSIAO, R. C.; CHEN, P. C.; WU, Y. H. Effect of pulse power characteristics and gas flow rate on ozone production in a cylindrical dielectric barrier discharge ozonizer. *Vacuum*, Kidlington, v. 90, p. 65-69, 2013.
- TABATA, N.; YAMAMOTO, Y.; YAMAMURA, T. *Patente n. 4123664: ozone generating apparatus*. [S. l]: Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha, 1978.
- TYNAN, P. J.; LUNT, D. O.; HUTCHISON, J. *The formation of bromate during drinking water disinfection (DWE 7101)*. [S. l.: s. n.], 1993. Disponível em: <<http://dwi.defra.gov.uk/research/completed-research/reports/dwi0137.pdf>> Acesso em: 24 de out. 2013.
- VIJAYAN, T.; PATIL, J. G. High-tension corona controlled ozone generator for environment protection. *Journal of Physics: Conference Series*, Bristol, v. 208, p. 1-7, 2010.

---

WATER INVENTION. *Corona Discharge vs. UV Ozone*, 2013. Disponível em: <[http://www.waterth.com/products/pdf\\_files/applier\\_ozone.pdf](http://www.waterth.com/products/pdf_files/applier_ozone.pdf)>. Acesso em: 22 de out. 2013.

WAYNE SMITH, WATERTEC ENGINEERING PTY LTD. *Principles of ozone generation*. Camberra, 2012. Disponível em: <<http://watertecengineering.com/TZ000002%20Principles%20of%20Ozone%20Generation.pdf>>. Acesso em: 21 de out. 2013.

XU, L. Use of ozone to improve the safety of fresh fruits and vegetables. *food technology*, Chicago, v. 53, n. 10, p. 58-62, 1999.

YANALLAH, K.; PONTIGA, F.; MESLEM, Y.; CASTELLANOS, A. An analytical approach to wire-to-cylinder corona discharge. *Journal of Electrostatics*, Amsterdam, v. 70, p. 374-383, 2012.

---

---

## APÊNDICE A - Fornecedores Consultados

### *Medição da concentração de ozônio gerado*

Para o método amperométrico existem vários fornecedores de sensores e equipamentos no Brasil, algum deles são apresentados na sequência:

#### PROMINENT BRASIL LTDA

Endereço: R. Alfredo Dumont Villares, 115, São Bernardo do Campo, 09672-070.

Telefone: +55 11 4176-0722

Contato: prominent@prominent.com.br

<http://www.prominent.com.br/Produtos/Tecnologia-de-Medi%C3%A7%C3%A3o-Controle-e-Sensores-2/Tecnologia-de-Medi%C3%A7%C3%A3o-Controle-e-Sensores.aspx>

[http://www.prominent.pt/Portaldata/1/Resources/\\_transfer/2012/20121220\\_11646\\_98527\\_9\\_BA\\_DT\\_005\\_12\\_12\\_Dulcotest\\_OZE\\_PT.pdf](http://www.prominent.pt/Portaldata/1/Resources/_transfer/2012/20121220_11646_98527_9_BA_DT_005_12_12_Dulcotest_OZE_PT.pdf)

#### METTLER-TOLEDO IND. E COM. LTDA.

Endereço: Avenida Tamboré, 418 – Tamboré – Barueri – SP, 06460-000.

Telefone: +55 11 4166 7400

Contato: mettler@mettler.com.br

<http://br.mt.com/br/pt/home.html>

[http://br.mt.com/dam/mt\\_ext\\_files/Editorial/Generic/7/FF\\_TH\\_Ozone\\_sensors\\_Editorial-Generic\\_1157459178971\\_files/ff\\_th\\_ozone\\_sensorptjan07.pdf](http://br.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/7/FF_TH_Ozone_sensors_Editorial-Generic_1157459178971_files/ff_th_ozone_sensorptjan07.pdf)

Para o método de colorimetria existem também vários fornecedores de kits, equipamentos e compostos químicos no Brasil e no mundo, algum deles são mostrados na sequência:

#### HANNA INSTRUMENTS

Endereço: Rua Pretoria, 1027/1039, São Paulo – SP / 03416-000

Telefone: (5511) 2076-5080

Contato: vendas@hannabrasil.com

---

<http://www.hannabrasil.com/>

<http://www.hannabrasil.com/produtos/estojos-para-analises-quimicas/estojos-para-analises-quimicas-com-um-parametro/test-kit-de-ozonio>

### OZONE SOLUTIONS

Endereço: 451 Black Forest Rd.Hull, IA 51239 USA

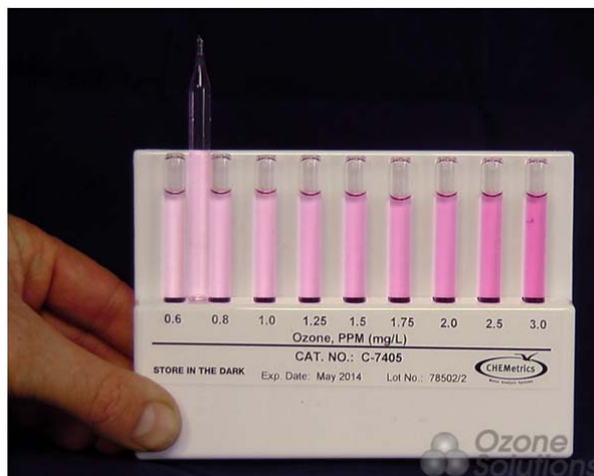
Telefone: (712) 439-6880

Contato: [support@ozonesolutions.com](mailto:support@ozonesolutions.com)

[http://www.ozonesolutions.com/products/Ozone-Monitors/Dissolved-Ozone/K-7404\\_Dissolved\\_Ozone\\_Vacuial\\_Kit](http://www.ozonesolutions.com/products/Ozone-Monitors/Dissolved-Ozone/K-7404_Dissolved_Ozone_Vacuial_Kit)

A Figura 86 mostra o padrão de comparação fornecido pelo produto da Ozone Solutions.

Figura 86 – Padrão concentração ozônio da Ozone Solutions.



Fonte: Ozone Solutions. Disponível em [http://www.ozonesolutions.com/products/Ozone-Monitors/Dissolved-Ozone/K-7404\\_Dissolved\\_Ozone\\_Vacuial\\_Kit](http://www.ozonesolutions.com/products/Ozone-Monitors/Dissolved-Ozone/K-7404_Dissolved_Ozone_Vacuial_Kit)

É possível comprar diretamente o composto Oxalato DPD – N, N-dietil-p-fenilenodiamina Oxalato, o qual é o mais comumente empregado na medição de ozônio por colorimetria, conforme as seguintes opções:

### SIGMA-ALDRICH

Contato: [sigmabr@sial.com](mailto:sigmabr@sial.com)

<http://www.sigmaaldrich.com/brazil.html>

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/fluka/70064?lang=pt&region=BR>

### SOLOSTOCKS

<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/outras-produtos-quimicos/reagente-dpd-mod-sl-10-815631>

### BVP PRODUTOS QUÍMICOS E ARTIGOS PARA LABORATÓRIOS

[http://www.bvp.com.br/component/virtuemart/?page=shop.product\\_details&category\\_id=15&flypage=flypage.tp-ecommerce.tpl&product\\_id=1177](http://www.bvp.com.br/component/virtuemart/?page=shop.product_details&category_id=15&flypage=flypage.tp-ecommerce.tpl&product_id=1177)

Com o método de colorimetria é possível medir a concentração de ozônio na mescla gás-água por unidade de volume de forma aproximada, a qual junto com o dado do caudal do ozonizador é possível conhecer as gramas de ozônio produzidas por unidade de tempo.

Foi adquirido o kit Teste Kit Ozônio 0,0-2,3 mg/l (100 testes) da empresa Hanna Instruments Brasil Importação e Exportação Ltda, com o orçamento disponível no link (<https://www.dropbox.com/s/sofd7nphizj3hnc/kitozônio.pdf>). O link com os dados do manual de funcionamento do kit é o seguinte: ([http://www.hannabrasil.com/suporte/downloads/doc\\_download/56-manual-hi-38054](http://www.hannabrasil.com/suporte/downloads/doc_download/56-manual-hi-38054)).

### ***Transformador elevador de alta frequência***

O transformador elevador de alta frequência projetado na seção 3.2.1 foi solicitado para ser construído por diferentes fabricantes. Contudo, o único que desenvolveu o projeto conforme especificações de projeto foi a Tecnotrafo, conforme dados a seguir:

#### TECNOTRAFO

Rua Cidade de Bagdá 554, Vila SantaCatarina, São Paulo.

Tel: (11) 5563-4303

[www.tecnotrafo.com.br](http://www.tecnotrafo.com.br)

[tecnotrafo@tecnotrafo.com.br](mailto:tecnotrafo@tecnotrafo.com.br)

O transformador fornecido é apresentado em detalhe na Figura 87

Figura 87 – Transformador elevador, de alta tensão e de alta frequência desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

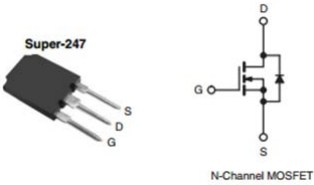
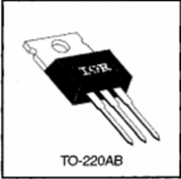
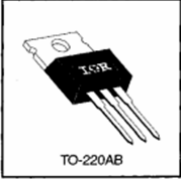
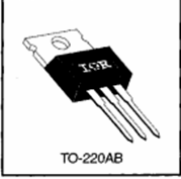


## APÊNDICE B

### Principais componentes selecionados

Mostram-se na sequência os componentes disponíveis no laboratório que poderiam satisfazer os parâmetros de operação do conversor Boost, do estágio de entrada.


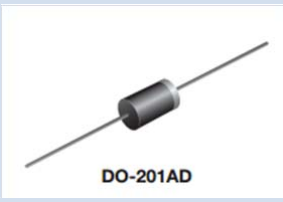
Tabela 17 – Possíveis Transistores para o estágio Boost.

POSSÍVEIS TRANSISTORES PARA APLICAÇÃO		
<b>IRF543N50K</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	500	
Máxima corrente média [A]:	47	
Corrente de pico transitória [A]:	0,07	
Resistencia em condução [ohms]:	8	
<a href="http://www.vishay.com/docs/91262/91262.pdf">http://www.vishay.com/docs/91262/91262.pdf</a>	190	
<b>IRF840</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	500	
Máxima corrente média [A]:	8	
Corrente de pico transitória [A]:	32	
Resistencia em condução [ohms]:	0,85	
<a href="http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/8/IRF840.shtml">http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/8/IRF840.shtml</a>		
<b>IRF830</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	500	
Máxima corrente média [A]:	4,5	
Corrente de pico transitória [A]:	18	
Resistencia em condução [ohms]:	1,35	
<a href="http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/8/IRF830.shtml">http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/8/IRF830.shtml</a>		
<b>IRF740</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	400	
Máxima corrente média [A]:	10	
Corrente de pico transitória [A]:	40	
Resistencia em condução [ohms]:	0,48	
<a href="http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/7/IRF740.shtml">http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/7/IRF740.shtml</a>		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao diodo Boost, mostram-se na sequência os componentes disponíveis no laboratório que poderiam satisfazer os parâmetros de operação. Diodos tipo Ultra-Fast Recovery e Silicon Carbide Schottky são os preferidos para a aplicação.

Tabela 18 – Possíveis Diodos Boost para a aplicação

POSSÍVEIS DIODOS BOOST PARA A APLICAÇÃO		
<b>FR305</b>		
<b>C3D10060A</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	600	
Máxima corrente média [A]:	10	
Corrente de pico transitória [A]:	67	
Silicon Carbide Schottky Diode		
<a href="http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/C3D10060A.pdf">http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/C3D10060A.pdf</a>		
<b>MUR460</b>		
Tensão máxima de bloqueio [V]:	500	
Máxima corrente média [A]:	4,5	
Corrente de pico transitória [A]:	18	
Resistencia em condução [ohms]:	1,35	
<a href="http://www.vishay.com/docs/88686/mur440.pdf">http://www.vishay.com/docs/88686/mur440.pdf</a>		

Fonte: Elaborado pelo autor

Para manter a tensão no barramento CC de saída do estágio Boost, mostram-se na sequência as principais opções de capacitores disponíveis no laboratório LEP que poderiam satisfazer os parâmetros de operação.

Tabela 19 – Possíveis Capacitores para a aplicação

POSSÍVEIS CAPACITORES PARA A APLICAÇÃO		
<b>120 <math>\mu</math>F @ 450V</b>		
Tensão máxima [V]:	450	
Capacitância [ $\mu$ F]:	120	
<a href="http://www.datasheetarchive.com/indexer.php?file=DSA0089181.pdf&amp;dir=Datasheet-094&amp;keywords=capxon+capacitor+400v&amp;data base=user-highscore#">http://www.datasheetarchive.com/indexer.php?file=DSA0089181.pdf&amp;dir=Datasheet-094&amp;keywords=capxon+capacitor+400v&amp;data base=user-highscore#</a>		
<b>100 <math>\mu</math>F @ 450v</b>		
Tensão máxima [V]:	450	
Capacitância [ $\mu$ F]:	100	
<a href="http://www.datasheetarchive.com/indexer.php?file=DSA0089181.pdf&amp;dir=Datasheet-094&amp;keywords=capxon+capacitor+400v&amp;data base=user-highscore#">http://www.datasheetarchive.com/indexer.php?file=DSA0089181.pdf&amp;dir=Datasheet-094&amp;keywords=capxon+capacitor+400v&amp;data base=user-highscore#</a>		

Fonte: Elaborado pelo autor.