

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**MODELAGEM, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA GERADOR
DE OZÔNIO, OPERANDO EM ALTA FREQUÊNCIA COM CONTROLADOR
DIGITAL DE SINAIS**

GILSON JUNIOR SCHIAVON

Maringá - PR - Brasil

Junho de 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**MODELAGEM, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA GERADOR
DE OZÔNIO, OPERANDO EM ALTA FREQUÊNCIA COM CONTROLADOR
DIGITAL DE SINAIS**

Gilson Junior Schiavon
Eng^a Química, UEM, 2012
Orientadores:
Prof. Dr. Cid Marcos G. Andrade
Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso
Co-orientador:
Prof. Dr. Luiz Mario de Matos
Jorge

Tese de Doutorado submetida
à Universidade Estadual de
Maringá, como parte dos
requisitos necessários à
obtenção do Grau de Doutor
em Engenharia Química, área
de Modelagem, Controle e
Automação de Processos.

GILSON JUNIOR SCHIAVON

Maringá - PR - Brasil

Junho de 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

S329m Schiavon, Gilson Junior
Modelagem, desenvolvimento e análise de um sistema gerador de ozônio, operando em alta frequência com controlador digital de sinais / Gilson Junior Schiavon. -- Maringá, 2012.
264 f. : il. (algumas color.)

Orientador: Prof. Dr. Cid Marcos G. Andrade.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso.
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2012.

1. Gerador de ozônio. 2. Descarga corona. 3. Controle digital. 4. Conversor CC/CC. 5. DSC. 6. PI. 7. PWM. I. Andrade, Cid Marcos G., orient. II. Paraíso, Paulo Roberto, orient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 22. ed. 665.77
masa-000297

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Gilson Junior Schiavon perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 25 de junho de 2012.

COMISSÃO JULGADORA


Prof. Dr. Paulo Roberto Paraiso
Orientador / Presidente


Prof. Dr. Claiton Moro Franchi
Membro


Prof. Dr. Fábio Ranan Durand
Membro


Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani
Membro


Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Membro

Agradecimentos

Agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá por terem contribuído de forma direta ou indireta em mais esta etapa de minha formação, o que me proporcionou um conhecimento mais aprofundado sobre os conteúdos relacionados a modelagem, controle e automação de processos.

Aos professores Dr. Claiton Moro Franchi (UFMS), Dr. Fábio Renan Durand (UTFPR), Dr. Mauro A. S. S. Ravagnani (UEM) e Dr. Nehemias Curvelo Pereira (UEM) por aceitarem o convite de participar da comissão examinadora deste trabalho.

Aos professores Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade, Dr. Paulo Roberto Paraíso e Dr. Luiz Mario de Matos Jorge, por terem me orientado com muita calma e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de turma no qual tive uma ótima convivência e troca de conhecimentos no decorrer do curso.

Aos amigos Gleison Luiz Oberleitner e Fábio Adriano Salinas pela parceria, apoio e dedicação prestados na montagem e testes de protótipos do projeto.

A minha esposa Fabiana Percinoto Monteiro Schiavon por todo seu amor, paciência, apoio e compreensão que foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Pedro Schiavon e Maria Aparecida Schiavon por terem me dado uma ótima educação, estudo e muito amor, sempre me incentivando a seguir em frente e nunca desistir diante a um obstáculo, me fazendo acreditar em um futuro melhor.

Aos meus irmãos Johnnes Aparecido Schiavon e Djeine Cristina Schiavon por todo seu apoio e incentivo.

A Deus por ter me proporcionado a oportunidade de realizar este estudo, pois além de acreditar na ciência, creio que existe uma força maior criadora de tudo.

Meu muito obrigado a todos!

Epígrafe

“Uma coisa aprendi na minha longa vida: que toda nossa ciência, contraposta à realidade, é primitiva e infantil. E, apesar disso, é a coisa mais preciosa que temos.”

Albert Einstein (Físico alemão)

Resumo

MODELAGEM, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA GERADOR DE OZÔNIO, OPERANDO EM ALTA FREQUÊNCIA COM CONTROLADOR DIGITAL DE SINAIS

Gilson Junior Schiavon

Junho, 2012

Atualmente o ozônio tem sido muito estudado para aplicações em tratamento de água, tratamento de efluentes domésticos e industriais, na medicina, na odontologia, na medicina veterinária, agricultura, desinfecção de ambientes, conservação de alimentos entre outros.

O ozônio pode ser produzido de três formas principais: por eletrólise, UV (ultravioleta) e descarga corona. A maioria dos geradores de ozônio baseados na descarga corona, base deste trabalho, são constituídos por fontes de alimentação convencionais operando em baixa frequência, as quais possuem baixo rendimento, são robustas e não possuem sistema de controle, refletindo assim, todas as variações de entrada em sua saída, além de não compensar variações de carga, ocasionando instabilidades na produção de ozônio. Nestes geradores a produção de ozônio é fixa e quando necessário uma variação, a vazão do gás alimentador deve ser alterada, observando que a energia elétrica consumida pelo gerador continua a mesma.

Desta forma, o presente trabalho consiste de um amplo projeto envolvendo as áreas de modelagem, controle e automação de processos, eletrônica de potência e processos químicos, resultando ao final do mesmo a implementação da placa de potência, placa de controle analógico, placa de controle digital e reator do sistema gerador de ozônio, baseado no princípio de descarga corona. O gerador desenvolvido, possibilita aplicações em processos oxidativos em geral, sendo o mesmo projetado e implementado em malha fechada com ação proporcional e integral (PI), controle analógico e em seguida digital com DSC (Controlador Digital de Sinais) para comparação de desempenho.

A etapa de potência é constituída por dois conversores chaveados em alta frequência, um conversor *buck* e um conversor *flyback*. Por meio da tecnologia de

fontes chaveadas em alta frequência é possível variar a produção do ozônio gerado, atuando diretamente no sinal de controle dos conversores, desta forma variando o consumo de energia elétrica proporcionalmente a produção de ozônio requerida, fornecendo uma economia de energia.

São apresentados o estágio de potência, o controle analógico em malha fechada, o controle digital e o reator desenvolvido, além da implementação de todas as funções, proteções e sinalizações do sistema que controla o gerador de maneira analógica e digital.

Os resultados experimentais de funcionamento e sugestões de aplicações apresentados, foram obtidos a partir do protótipo implementado, comprovando experimentalmente a funcionabilidade da técnica desenvolvida, mostrando ser uma alternativa viável para aplicações em processos oxidativos.

Palavras-chave: Gerador de ozônio, descarga corona, controle digital, conversor CC/CC, DSC, PI, PWM.

Abstract**MODELING, ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF AN OZONE GENERATOR SYSTEM, OPERATING AT HIGH FREQUENCY WITH DIGITAL SIGNAL CONTROLLER****Gilson Junior Schiavon****June, 2012**

Currently ozone has been studied for applications in water treatment, treatment of domestic and industrial effluents, in medicine, dentistry, veterinary medicine, agriculture, disinfection of environments, food preservation and others.

Ozone can be produced in three main ways: by electrolysis, UV (ultraviolet) and corona discharge. Most ozone generators based on the corona discharge, based on this work, consist of conventional power sources operating at low frequency, which have low incomes, are robust and have no control system, thus reflecting all variations of input on its output, and does not compensate for load variations, causing instability in the production of ozone. In these generators, ozone production is fix and where necessary a variation, the flow of feed gas should be changed, noting that the power consumed by the generator remains the same.

Thus, the present work consists of a large project involving the areas of modeling, control and process automation, power electronics and chemical processes, leading to the final implementation of the power board, control analog, digital and reactor the ozone generator system, based on the principle of corona discharge. The generator developed allows applications in oxidative processes in general, the same being designed and implemented in closed loop with proportional and integral (PI) action, analog control and digital using DSC (Digital Signal Controller), for performance comparison.

The power stage consists of two switched converters in high frequency, a buck converter and a flyback converter. By means of the technology the power supplies in high frequency, is possible to vary the production of ozone generated by acting directly on the control signal the converters, thereby varying the electrical

power consumption proportionally the production of ozone required, providing an economy of energy.

Are presented the power stage, the analog control in closed-loop, digital control and the reactor developed, the implementation of all functions, protections and signaling for system, that controls the generator so analog and digital.

The experimental results of operation and suggestions for applications, were obtained from the prototype implemented, experimentally confirming the functionality of the developed technique, being a viable alternative for applications in oxidative processes.

Keywords: Ozone generator, corona discharge, digital control, DC/DC converter, DSC, PI, PWM.

Abreviações

APHA	<i>American public health association</i>
AWG	<i>American wire gauge</i>
AWNA	<i>American water works association</i>
CA/CC	Corrente alternada para corrente contínua
CC/CC	Corrente contínua para corrente contínua
CDiff	<i>Clostridium difficile</i>
CFIA	<i>Canadian food inspection agency</i>
CIP	<i>Clean in place</i>
CPL	<i>Combined programming language</i>
CREAL	Centro em epidemiologia ambiental
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DNA	<i>Ácido desoxirribonucléico</i>
DNPM	Departamento nacional de produção mineral
DQO	Demanda química de oxigênio
DSC	<i>Digital signal controller</i>
DSP	<i>Digital signal processor</i>
FDA	<i>Food and drug administration</i>
FET	Transistor de efeito de campo
GRAS	<i>Generally recognized as safe</i>
I	Integral
IBWA	<i>International bottled water association</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
KPC	<i>Klebsiella pneumoniae carbapenemase</i>
LCD	<i>Liquid crystal display</i>
MAC	<i>Multiply and accumulate</i>
MOS	Metal-Óxido-Semicondutor
MRSA	<i>Methicillin-resistant Staphylococcus aureus</i>
NOX	Número de oxidação
NPN	Negativo-Positivo-Negativo
NTC	<i>Negative temperature coefficient</i>

OD	Oxigênio dissolvido
oppu	Produção de ozônio por unidade de força
ORP	<i>Oxidation reduction potential</i>
OSHA	<i>Occupational safety and health association</i>
P	Proporcional
PD	Proporcional mais derivativo
PH	Potencial hidrogeniônico
PI	Proporcional mais integral
PID	Proporcional mais integral mais derivativo
PPB	Parte por bilhão
PPM	Parte por milhão
PWM	Modulação por largura de pulso
RNA	<i>Ácido ribonucléico</i>
SER	Resistência série equivalente
SUS	Sistema único de saúde
THM	<i>Trihalometanos</i>
TLV	<i>Threshold limit value</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UPS	<i>Uninterruptible power supply</i>
UTI	Unidade de terapia intensiva
UV	Ultravioleta
VOC	Compostos orgânicos voláteis
WIP	<i>Wash in place</i>
ZOH	<i>Zero order hold</i>

Símbolos

A/D	Analógica digital
AP	Produto das áreas
a-Si	Silício amorfo hidrogenado
BCPL	Basic CPL
B _{máx}	Densidade de fluxo (Tesla)
Cd	Coeficiente de descarga
CdTe	Telureto de cádmio
c-Si	Silício cristalino
D	Razão cíclica
D/A	Digital analógica
D _i	Ganho integral
F _a	Frequência de amostragem (Hz)
FB	<i>Feedback</i>
f _c	Frequência de corte (Hz)
F _{máx}	Frequência máxima (Hz)
I _{dmg}	Corrente de desmagnetização (A)
I _{mg}	Corrente de magnetização (A)
K _D	Ganho derivativo
K _j	Coeficiente de densidade de correntes nos fios
KI	Iodeto de potássio
K _P	Ganho proporcional
K _u	Fator de utilização das janelas
M _p	Máximo sobre sinal
NO _x	Óxido nitroso
N _{tio}	Normalidade do tiosulfato de sódio (N)
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
r ₀	Raio do cilindro interno (cm)
R _c	Resistência série do capacitor (Ω)
Re	Número de Reynolds
r _{ext}	Raio do cilindro externo (cm)

R_L	Resistência série do indutor (Ω)
S/H	<i>Sample-and-hold</i>
t_d	Tempo de atraso (s)
T_D	Tempo derivativo (s)
T_i	Tempo integral (s)
T_{off}	Tempo desligado (s)
T_{on}	Tempo ligado (s)
t_p	Tempo de pico (s)
t_r	Tempo de subida (s)
t_s	Tempo de acomodação (s)
V_0	Tensão aplicada (V)
V_{AM}	Volume da amostra a ser titulada (L)
V_{CESAT}	Tensão de saturação do transistor (V)
Verro	Tensão de erro (V)
V_i	Tensão de entrada (V)
V_{KI}	Volume da solução de iodeto de potássio (L)
V_{ref}	Tensão de referência (V)
$\Delta\phi$	Varição de fase
ζ	Fator de amortecimento
ω	Frequência angular (rad/s)

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparação de agentes oxidantes	15
Tabela 2. Comparação entre ozônio e cloro.....	16
Tabela 3. Comparação de ações entre ozônio e cloro	17
Tabela 4. Solubilidade do ozônio e oxigênio em água de acordo com a Lei de Henry.....	24
Tabela 5. Dados da aplicação de ozônio para tratamento de água	57
Tabela 6. Aplicações de gás ozônio.....	57
Tabela 7. Patógeno versus dosagem.....	58
Tabela 8. Eficiência do ozônio em componentes de odor	67
Tabela 9. Especificações elétricas para projeto do conversor <i>buck</i>	127
Tabela 10. Especificações elétricas para projeto do circuito de controle	146
Tabela 11. Resumo dos valores calculados.....	150
Tabela 12. Circuitos com amplificadores operacionais que podem ser utilizados como compensadores	154
Tabela 13. Características do dsPIC30F2010.....	163
Tabela 14. Especificações técnicas para o conversor <i>flyback</i>	170
Tabela 15. Especificações para o circuito retificador	171
Tabela 16. Especificações para o conversor CA/CC.....	172
Tabela 17. Rendimento do conversor <i>buck</i>	197
Tabela 18. Resultados – ensaios de titulação iodométrica	213

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de blocos do gerador de ozônio.....	4
Figura 2. História do ozônio.....	13
Figura 3. Formação do ozônio.....	16
Figura 4. Simulação computacional da degradação de membrana bacteriana....	18
Figura 5. Relações de concentração/tempo entre a exposição ao ozônio e a resposta humana.....	20
Figura 6. Taxas de decomposição do ozônio em vários tipos de água a 20°C	22
Figura 7. Geração de ozônio por UV.....	25
Figura 8. Esquema de geração de ozônio por efeito corona.....	26
Figura 9. Processo de descarga corona.....	27
Figura 10. Frequência do pulso Trichel em duas escalas diferentes.....	30
Figura 11. Desenvolvimento de avalanches de elétron em descargas corona negativas.....	31
Figura 12. Características corona e ruptura em ponta-plano negativo no ar atmosférico.....	32
Figura 13. Desenvolvimento e geração de avalanches nas descargas corona positivas	34
Figura 14. Curvas limiares dos vários modos de corona positivo e para ruptura de centelhas para um anodo tipo ponta e um catodo tipo placa	36
Figura 15. Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada.....	37
Figura 16. Descargas corona	38
Figura 17. Esquema básico de um venturi	46
Figura 18. Analisador de gás ozônio <i>ANSEROS – Monitor MP</i>	52
Figura 19. Transmissor M300 THORNTON	52
Figura 20. Transmissor multiparâmetro 770MAX e sensor	54
Figura 21. Transmissor 2000 com dois canais e sensor	54
Figura 22. Simulador de ozônio e sinais de temperatura THORNTON.....	55
Figura 23. Família de transmissores 2 fios - Modelo 5081	55
Figura 24. Monitor portátil de ozônio da <i>O3 Technologies Co.</i>	56
Figura 25. Sensor/analizador de ozônio da <i>O3 Technologies Co</i>	56
Figura 26. Produção de ozônio a partir de poluentes.....	80
Figura 27. Diagrama de blocos de uma fonte chaveada	82

Figura 28. Tecnologias de fontes	83
Figura 29. Diagrama de blocos de uma conversão A/D	93
Figura 30. Representação do sinal analógico e digital	93
Figura 31. Diagrama de blocos da conversão A/D	94
Figura 32. Conversor A/D de 4 bits	95
Figura 33. Sinal digitalizado	99
Figura 34. Retificação e amplificação de um sinal de áudio.....	100
Figura 35. Ciclo de vida clássico de <i>software</i>	101
Figura 36. Diagrama de blocos do gerador de ozônio proposto.....	107
Figura 37. Detalhe interno do gerador com fonte convencional e 2 reatores	108
Figura 38. Detalhe interno do gerador com conversor <i>buck</i> com controle analógico	109
Figura 39. Gerador de ozônio com conversores <i>buck</i> e <i>flyback</i> com controle digital	109
Figura 40. Detalhe externo do gerador com instalação.....	109
Figura 41. Detalhe da injeção de ozônio pelo venturi.....	110
Figura 42. Características de corona estabelecido e ruptura em ponta-plano, no ar	111
Figura 43. Sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext}	112
Figura 44. Variação da intensidade do campo para corona estabelecido (E_c/δ) com δr para geometria cilíndrica coaxial no ar	115
Figura 45. Relação entre tensão de ruptura e raio interno em um sistema de cilindro coaxial.....	116
Figura 46. Plasma corona crescendo com o aumento da tensão.....	117
Figura 47. Circuito elétrico do conversor tipo <i>buck</i>	118
Figura 48. Formas de onda do conversor <i>buck</i>	119
Figura 49. Corrente no indutor L	121
Figura 50. <i>Ripple</i> no capacitor de saída em um conversor <i>buck</i>	123
Figura 51. Transiente de corrente e tensão na saída do conversor <i>buck</i> (aumento de corrente).....	125
Figura 52. Transiente de corrente e tensão na saída de um conversor <i>buck</i> (diminuição de corrente).....	126
Figura 53. Circuito elétrico do conversor tipo <i>buck</i>	128

Figura 54. Circuito completo do conversor <i>buck</i>	132
Figura 55. Diagrama de blocos do controle do conversor CC/CC	133
Figura 56. Parâmetros de entrada e saída em um conversor CC/CC	134
Figura 57. Diagrama de blocos de um circuito com realimentação negativa	135
Figura 58. Resposta em frequência em amplitude e fase	136
Figura 59. Diagrama de Bode para a função de transferência	137
Figura 60. Diagrama de blocos do controle	137
Figura 61. Amplificador operacional	138
Figura 62. Circuito elétrico equivalente para o controle por realimentação de tensão	139
Figura 63. Diagrama de Bode	141
Figura 64. Projeto do compensador para o conversor <i>buck</i> modo contínuo	145
Figura 65. Diagrama de Bode com compensador	146
Figura 66. Circuito implementado, controle e potência	147
Figura 67. Circuito implementado, compensador e potência	150
Figura 68. Controlador eletrônico PID	151
Figura 69. Diagrama de blocos da placa de controle digital	156
Figura 70. Circuito do DSC	157
Figura 71. Circuito do sensor de temperatura	157
Figura 72. Circuito de amplificação do sinal PWM	158
Figura 73. Circuito de adequação de nível	159
Figura 74. Circuito do limitador da corrente de partida	159
Figura 75. Circuito de sinalização do alarme	160
Figura 76. Circuito amplificador shunt	160
Figura 77. Circuito de monitoramento da rede CA	161
Figura 78. Esquema elétrico do acionamento do ventilador	162
Figura 79. Conversor <i>buck</i> com sinal de realimentação	162
Figura 80. Estrutura utilizada para o cálculo dos compensadores no programa do DSC	163
Figura 81. Pinos dsPIC30F2010 28-Pin SDIP	164
Figura 82. Circuito e formas de onda de um conversor <i>flyback</i> operando no modo contínuo e com transformador	165
Figura 83. Circuito completo do conversor <i>flyback</i>	170
Figura 84. Circuito retificador completo	171

Figura 85. Circuito completo do conversor CA/CC	172
Figura 86. Circuito <i>drive</i> para o conversor <i>buck</i>	173
Figura 87. <i>Timer</i> utilizado no gerador.....	174
Figura 88. Sistema de tratamento por ozônio para piscinas	175
Figura 89. Detalhe da instalação do tubo venturi	175
Figura 90. Instalação para ensaio de tratamento de efluente industrial	176
Figura 91. Tubo venturi	176
Figura 92. Solução de KI antes do borbulhamento com O ₃	182
Figura 93. Solução de KI 2% sendo ozonizada.....	182
Figura 94. Solução de KI 2% ozonizada	183
Figura 95. Fervendo a solução de amido por 7 minutos	183
Figura 96. Solução de KI 2% ozonizada sendo titulada com tiosulfato de sódio	183
Figura 97. Adicionando amido na solução, após atingir a coloração amarela palha	184
Figura 98. Titulando com tiosulfato após adição do amido.....	184
Figura 99. Solução ao final da titulação	184
Figura 100. Sistema de energia solar.....	190
Figura 101. Sinal de saída da fonte convencional.....	192
Figura 102. Sinal de saída do circuito astável.....	192
Figura 103. Amostra do sinal de saída do conversor <i>flyback</i> , alimentado com fonte convencional	193
Figura 104. Sinal de saída do conversor <i>buck</i> com controle analógico.....	194
Figura 105. Sinal PWM analógico para o conversor <i>buck</i> alimentado em 127 V	195
Figura 106. Sinal PWM analógico para o conversor <i>buck</i> alimentado em 220 V	195
Figura 107. Sinal PWM analógico para o conversor <i>flyback</i>	196
Figura 108. Amostra do sinal de saída do conversor <i>flyback</i> , quando alimentado com fonte chaveada e com controle analógico	196
Figura 109. Sinal PWM sem carga, alimentado em 127 Vrms	198
Figura 110. Sinal PWM sem carga, alimentado em 220 Vrms	198
Figura 111. Saída sem carga, alimentado em 127 Vrms	199
Figura 112. Sinal PWM com 50% de carga, alimentado em 127 Vrms.....	199
Figura 113. Sinal PWM com 50% de carga, alimentado em 220 Vrms.....	200
Figura 114. Sinal PWM com 100% de carga, alimentado em 127 Vrms.....	200

Figura 115. Sinal PWM com 100% de carga, alimentado em 220 Vrms	201
Figura 116. Sinal PWM acionando <i>flyback</i> , alimentado em 127 Vrms	201
Figura 117. Sinal PWM acionando <i>flyback</i> , alimentado em 220 Vrms	202
Figura 118. Start sem ação PI, alimentado em 127 Vrms	202
Figura 119. Start com ação PI, alimentado em 127 Vrms	203
Figura 120. Degrau de carga de 0 a 50%, entrada e saída de carga.....	203
Figura 121. Degrau de carga de 50 a 100%, entrada e saída de carga.....	204
Figura 122. Gráfico V_{out} x V_{in} para o conversor <i>flyback</i>	205
Figura 123. Gráfico V_{out} x P_{in} para o conversor <i>flyback</i>	206
Figura 124. Sinal PWM do conversor <i>flyback</i>	206
Figura 125. Amostra da tensão de saída do conversor <i>flyback</i>	207
Figura 126. Amostra do crescimento da tensão de saída com ação do soft-start	208
Figura 127. Ensaio de desempenho dos conversores <i>buck</i> e <i>flyback</i> com controle digital	208
Figura 128. Descarga corona no interior do reator.....	209
Figura 129. Gerador de ozônio com 6 reatores e concentrador de oxigênio.....	210
Figura 130. Gerador de ozônio com 6 reatores.....	210
Figura 131. Produção de ozônio na saída do gerador	214
Figura 132. Injetando efluente industrial para ensaio de tratamento.....	217
Figura 133. Efluente na cuba de tratamento	217
Figura 134. Resultado ao final do tratamento.....	217
Figura 135. Corante industrial bruto sendo injetado na cuba (50L).....	218
Figura 136. Corante industrial após 40 min de tratamento.....	218
Figura 137. Corante industrial após 2 horas de tratamento	219
Figura 138. Resultado final coletado de 10 em 10 min em 2h	219
Figura 139. Curtume bruto	220
Figura 140. Curtume após 4 horas de tratamento.....	220
Figura 141. Caldo de cana após 4 horas de tratamento	221

Índice de Texto

Agradecimentos	iii
Epígrafe	iv
Resumo	v
Abstract	vii
Abreviações	ix
Símbolos	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xiv
Índice de Texto	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do Problema	1
1.2 Objetivos do Trabalho.....	7
1.2.1 Objetivos Específicos	7
1.2.2 Considerações Complementares	8
1.2.3 Justificativa.....	9
1.3 Estrutura do Trabalho	10
1.4 Principais Contribuições do Trabalho	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Ozônio	13
2.2 Mecanismo de Ação do Ozônio	18
2.3 Toxicidade do Ozônio para o Ser Humano.....	19
2.4 Estabilidade do Ozônio	22
2.5 Solubilidade do Ozônio na Água.....	23
2.6 Geração de Ozônio.....	24
2.6.1 Geração por Eletrólise.....	24
2.6.2 Geração por Raios Ultravioleta	25
2.6.3 Geração por Efeito Corona	26
2.6.3.1 Corona CC Negativo.....	29
2.6.3.2 Corona CC Positivo	34
2.6.3.3 Corona CA.....	37

2.6.3.4 Outros tipos de Descarga Corona	38
2.7 Sistemas de Geração de Ozônio Propostos na Literatura	39
2.8 Ozônio em Contato com Sistemas Aquosos.....	45
2.9 Métodos de Determinação de Ozônio no Ar e na Água.....	47
2.9.1 Medição de Ozônio no Ar	47
2.9.2 Medição de Ozônio na Água	48
2.9.3 Métodos Disponíveis	48
2.9.4 Sensores Eletrônicos	51
2.10 Aplicações de Ozônio VS Concentração	56
2.11 Unidades de Medidas para o Gás Ozônio	59
2.12 Aplicações do Ozônio	62
2.13 Ozônio: Aliado e Inimigo	79
2.14 Fontes de Alimentação Eletrônicas	80
2.15 Controle Digital	84
2.15.1 Microprocessadores, Microcontroladores, DSP´s e DSC´s.....	87
2.15.2 Processamento em Tempo Real.....	91
2.15.3 Conversão A/D e D/A.....	92
2.15.4 Segurador de Ordem Zero (ZOH)	96
2.15.5 Efeito da Amostragem – <i>Aliasing</i>	96
2.15.6 Ponto Fixo e Ponto Flutuante.....	97
2.15.7 Processamento Digital de Sinais.....	98
2.15.8 Planejamento e Projeto de um <i>Software</i>	100
2.15.9 Linguagem de Programação C	102
2.16 Controle Automático	103
2.16.1 Introdução	103
2.16.2 Revisão Histórica	104
3 METODOLOGIA	107
3.1 Aspectos Gerais	107
3.2 Modelagem do Reator	110
3.2.1 Configuração Geométrica do Arranjo Experimental	112
3.3 Modelagem Conversão <i>Buck</i>	118
3.3.1 Conversão <i>Buck</i>	118
3.3.2 Operação em Modo Contínuo	121

3.3.3 Cálculo do Indutor	122
3.3.4 Cálculo do Capacitor	123
3.3.5 Resposta a Transitórios de Corrente.....	125
3.3.6 Projeto do Conversor <i>Buck</i> (Parte de Potência).....	127
3.4 Modelagem do Circuito de Controle Analógico.....	132
3.4.1 Estabilidade de Conversores CC/CC Realimentados	134
3.4.2 Modelo para Análise de Estabilidade	137
3.4.3 <i>Buck</i> Modo Contínuo.....	139
3.4.4 Circuitos para Compensação em Frequência	142
3.4.5 Circuito de Compensação (<i>Buck</i> – Modo Contínuo)	144
3.4.6 Projeto do Circuito de Controle Analógico.....	146
3.4.7 Controlador PID com Amplificadores Operacionais	151
3.5 Modelagem do Controle Digital, Proteções, Sinalizações.....	155
3.5.1 Circuitos e DSC Utilizado para o Controle Digital	155
3.5.2 Características do DSC Utilizado	163
3.6 Modelagem Conversor <i>Flyback</i>	164
3.6.1 Operação em Modo Contínuo	165
3.7 Circuitos Auxiliares	171
3.7.1 Circuito Retificador e Filtro de Entrada.....	171
3.7.2 Conversor CA/CC.....	172
3.7.3 Drive para o Conversor <i>Buck</i>	173
3.8 Acessórios: <i>Timer</i> , Botão Emergência, Lâmpadas	173
3.9 Instalação	174
3.10 Equacionamento do Venturi.....	176
3.10.1 Equacionamento Básico.....	177
3.11 Titulação pelo Método Iodométrico.....	179
3.11.1 Ensaio de Produção	181
3.11.2 Materiais Utilizados	185
3.12 Sistema de Energia Solar	186
3.12.1 Tecnologia Fotovoltaica	187
3.12.2 Dimensionamento de Sistemas Solares.....	188
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES – GERADOR DE OZÔNIO.....	191
4.1 Resultados para o Gerador com Fonte Convencional	191

4.2 Resultados para o Gerador em Alta Frequência com Controle Analógico	193
4.3 Resultados para o Gerador em Alta Frequência com Controle Digital	197
4.3.1 Conversor <i>Buck</i>	197
4.3.2 Conversor <i>Flyback</i>	205
4.4 Resultados para os Circuitos Auxiliares, Proteções e Sinalizações	211
4.4.1 Proteção e Monitoramento da Temperatura.....	211
4.4.2 Monitoramento do Nível da Rede Elétrica.....	211
4.4.3 Circuito de Adequação de Nível.....	212
4.4.4 Circuito de Limitação de Corrente <i>Inrush</i>	212
4.4.5 Conversor CA/CC.....	212
4.4.6 Circuito Retificador e Filtro	213
4.5 Resultados: Titulação pelo Método Iodométrico	213
5 SUGESTÕES PARA PESQUISA - TRATAMENTOS	216
5.1 Tratamento de Efluente de uma Indústria de Alimentos	216
5.2 Tratamento de Resíduo a Base de Corante de uma Indústria Textil	218
5.3 Tratamento de Curtume.....	219
5.4 Clareamento de Caldo de Cana de Açúcar	220
5.5 Conservação de Alimentos.....	221
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	222
6.1 Conclusões	222
6.2 Sugestões Para Futuros Trabalhos	224
6.3 Publicações	225
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	226
ANEXOS	232
ANEXO 1: Esquema elétrico da etapa de potência do gerador convencional.	233
ANEXO 2: Esquema elétrico da etapa de controle do gerador convencional.	234
ANEXO 3: Esquema elétrico da etapa de potência do gerador em alta frequência.....	235
ANEXO 4: Esquema elétrico do conversor CA/CC – Fonte auxiliar.	236
ANEXO 5: Esquema elétrico da etapa de controle analógico.....	237

ANEXO 6: Esquema elétrico da etapa de controle digital.....	238
ANEXO 7: Esquema elétrico do sensor de nível de rede CA para controle digital.	239
ANEXO 8: Declaração de pedido de patente.....	240

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

O crescente avanço tecnológico tem proporcionado uma redução nos custos de muitos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos, tornando-os acessíveis a uma quantidade maior de consumidores. Portanto, o uso destes equipamentos já deixou de ser uma simples sofisticação e passou a fazer parte das necessidades básicas de manutenção da vida da população.

Atualmente o ozônio tem sido muito estudado para aplicações em tratamento de água, tratamento de efluentes domésticos e industriais, na medicina, na odontologia, na medicina veterinária, agricultura, desinfecção de ambientes, conservação de alimentos entre outros.

O ozônio pode ser produzido de três formas principais: por eletrólise, UV, e o efeito corona. No processo do efeito corona, o ozônio é gerado por uma descarga elétrica em um tubo de inox chamado de reator de ozônio. Neste tubo aplica-se uma descarga elétrica de alta tensão que juntamente com um fluxo de ar gera o gás ozônio, um gás com alto poder oxidante, cuja eficiência de produção aumenta quando gerado por oxigênio puro. O ozônio é composto por 3 átomos de oxigênio. Na forma gasosa é incolor, na forma líquida é azul escuro (Rice et al, 1986). O seu ponto de fusão é 80 K e de ebulição é de 161 K apresenta odor característico percebido em concentrações tão baixas quanto 0,015 ppm. É altamente instável em qualquer forma.

Uma das aplicações mais importantes é no tratamento de águas e efluentes. Cada vez mais são encontradas novas aplicações para o ozônio.

O ozônio como um poderoso desinfetante, não é somente eficiente no acondicionamento da água das piscinas, devido à destruição de esporos e vírus, como também na decomposição da urina, o seu uso gera economia, pela redução da necessidade do tratamento da água. Na Suíça, centenas de piscinas, em ambientes abertos ou fechados, são equipadas com tratamento de ozônio. O uso do ozônio em certas áreas ainda não é inteiramente competitivo com métodos tradicionais. Assim, o ozônio não representa a solução de todos os problemas,

mas tem vantagens definidas em muitos casos, fazendo com que mereça a pesquisa para seu uso econômico.

Uma das bebidas mais comuns é a água mineral, muitas, entretanto, contêm manganês e ferro. Aplicando-se os métodos usuais para a remoção de manganês e ferro, o dióxido de carbono dissolvido, naturalmente existente, será grandemente consumido. O uso do ozônio, neste caso, apresenta a vantagem de total oxidação do ferro e manganês, junto com a retenção de alta concentração do dióxido de carbono dissolvido. Simultaneamente o ozônio reage com outros materiais presentes que podem ser oxidados, e assim é capaz de destruir fragrâncias e odores.

Para estabelecer uma concentração constante de ozônio na saída dos geradores que utilizam o efeito corona, alguns cuidados são necessários, tais como, manter a tensão de saída (da ordem de kV) constante, uma vez que a concentração de ozônio é diretamente proporcional à tensão aplicada no reator, manter a corrente secundária constante, manter a vazão de ar/oxigênio em um ponto predeterminado e um controle de temperatura, visto que depois de um determinado tempo de funcionamento a temperatura aumenta gradativamente, desta forma ocasionando uma variação de corrente e conseqüente instabilidade na produção de ozônio. Tomando todos os cuidados com estes fatores, é provável que a saída de ozônio permanecerá constante.

Neste contexto, o presente estudo trata-se do projeto e desenvolvimento de um sistema gerador de ozônio, sua modelagem e análise, suas características e aplicações, utilizando e integrando novas tecnologias relacionadas à eletrônica de potência, analógica, digital, microcontroladores, processadores digitais de sinais (DSP), controladores digitais de sinais (DSC) e energias renováveis na busca de obter um sistema estável, compacto, com alto rendimento e automatizado.

Para o desenvolvimento do gerador de ozônio foram utilizadas duas topologias de conversores CC/CC, um conversor *buck* e um conversor *flyback* estudados em eletrônica de potência, que são conversores CC/CC chaveados em alta frequência que utilizam semicondutores rápidos do tipo MOSFET (*MOS – Metal-Óxido-Semicondutor*) (*FET – Field Effect Transistor*) de modo intensificação ou enriquecimento, que tem a capacidade de gerar facilmente altos níveis de tensão elétrica dependendo da topologia aplicada. Para o controle destes

conversores foi adotada a modulação por largura de pulso (PWM) em malha fechada com controle proporcional + integral (PI), sinal este que pode ser gerado por circuitos integrados convencionais ou digitalmente por dispositivos programáveis como microcontroladores, DSP's e DSC's, objetivando tensões e correntes de saída constantes. Foi efetuada uma comparação de desempenho dos controles analógico e digital quanto à estabilidade, uma vez que a tecnologia de controle digital com processamento em tempo real é tema de muitas pesquisas atualmente, por se tratar de uma tecnologia recente, mais ainda se tratando do DSC, esta área ainda está muito precária de material didático.

O gerador projetado também conta com algumas sinalizações, proteções e acessórios, sendo estas:

- Sensor de temperatura com duas ações, sendo a primeira com o acionamento de um sistema de refrigeração ventilado quando a temperatura atinge 50°C e a segunda quando a temperatura atinge 60°C, fazendo o acionamento de um alarme juntamente com o bloqueio total de funcionamento do gerador, protegendo assim os componentes do gerador de sobreaquecimento.
- Monitoramento do nível de tensão da rede elétrica sinalizando rede CA anormal (baixa ou alta).
- Limitador de corrente *inrush* cuja função é limitar a corrente de partida do equipamento, uma vez que este possui retificador e filtro de entrada.
- Sistema de partida suave (*soft-start*), ou seja, os sinais PWM dos conversores crescem gradativamente até atingirem os valores máximos programados no DSC, evitando assim, picos de corrente e tensão na partida do equipamento.
- Botão de emergência para desligamento total do sistema em caso de anormalidade.
- *Timer* digital para programação de funcionamento automático.
- Controlador de carga para o banco de baterias.

O uso de um DSC possibilitou a implementação de todas as sinalizações e proteções, assim como a geração dos pulsos PWM em malha fechada, via programação, diminuindo significativamente a quantidade de componentes eletrônicos, e, conseqüentemente, o tamanho e complexidade dos circuitos.

Apresenta-se na figura 1, o diagrama de blocos do gerador de ozônio proposto.

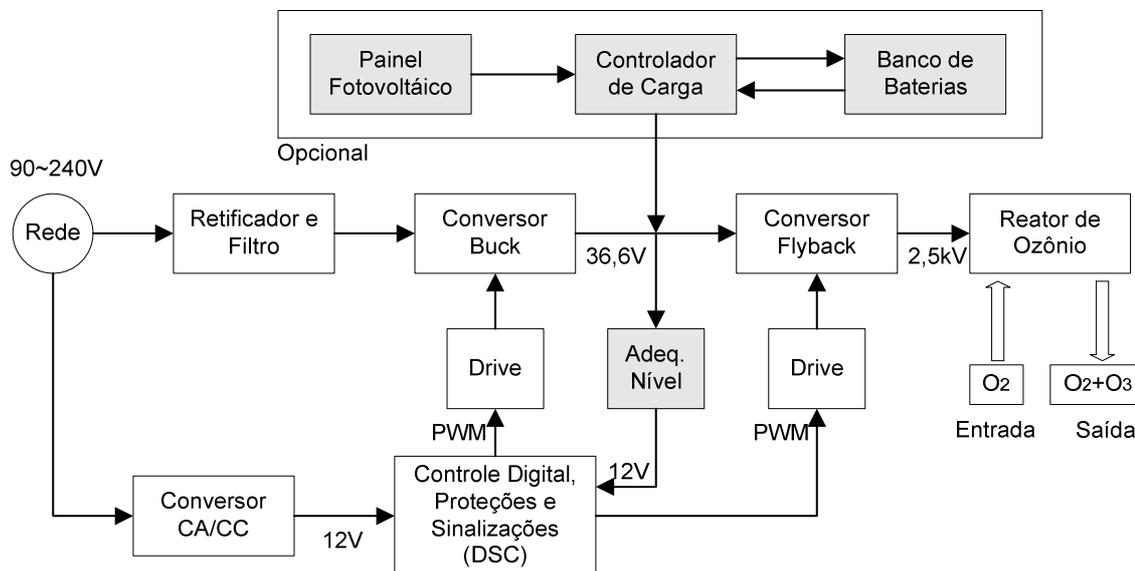


Figura 1. Diagrama de blocos do gerador de ozônio

A estratégia apresentada na figura 1 é justificada pela adoção de uma bobina automotiva para o conversor *flyback*, que será alimentado com uma tensão de 36,6 V e terá sua corrente de entrada limitada em 1,5 A. A bobina automotiva foi adotada pela facilidade de aquisição, garantia da qualidade quanto ao isolamento elétrico em alta tensão, fácil instalação, baixo custo e alta durabilidade, evitando assim, os problemas de produção e dificuldades na aquisição de matéria prima para confecção de um transformador. Os níveis de tensão adotados, facilitam também, a integração de um sistema fotovoltaico, sem a necessidade de implementação de um conversor elevador de tensão (*boost*).

Após a montagem das placas foram realizados os testes e ajustes necessários, bem como correções e mudança de componentes pertinentes. Também o acréscimo e retirada de componentes até que se atingisse o funcionamento desejado. As disparidades entre o projeto e a real necessidade prática, foram ajustadas resultando em uma placa final, que apresenta o funcionamento esperado do gerador de ozônio.

Como observado na figura 1, o gerador de ozônio foi dividido em blocos que serão descritos a seguir:

O primeiro bloco representa a rede elétrica em que o gerador de ozônio será alimentado, podendo ser ligado em 127 Vrms ou 220 Vrms sem a necessidade de uma chave seletora de tensão. Isto é possível devido ao uso de fontes chaveadas em alta frequência o que ainda elimina os enormes, pesados e caros transformadores de baixa frequência.

O bloco retificador é responsável pela retificação da rede elétrica, ou seja, a transformação da corrente alternada em corrente contínua, juntamente com um filtro de interferência eletromagnética, limitador de corrente *inrush* e filtro de saída, fornecendo assim uma tensão contínua que possui aproximadamente o valor de pico da tensão da rede elétrica em questão para o conversor *buck*.

Por sua vez, o bloco conversor *buck* tem a função de reduzir o valor da tensão retificada e filtrada pelo bloco retificador, visto que esta topologia de conversor fornece em sua saída uma tensão menor que sua entrada (conversor abaixador de tensão). O nível de tensão ajustado é de 36,6 V que será enviado ao conversor *flyback* e possibilitará o uso de um sistema de energia solar em conjunto.

A tensão de saída do conversor *buck* ou bateria será utilizada como alimentação pelo bloco conversor *flyback*, que tem a função de gerar a alta tensão (aproximadamente 2,5 kV) para o efeito corona no reator de ozônio.

O bloco reator de ozônio é o responsável pela quebra da molécula de oxigênio e consequente geração do ozônio em ambiente de descarga elétrica (efeito corona).

Até aqui foram descritos os blocos referente às etapas de potência do gerador de ozônio proposto, passando agora à descrição dos demais blocos, referentes ao controle, proteções, sinalizações e alimentação alternativa.

O bloco conversor CA/CC é uma fonte chaveada em alta frequência de baixa potência que tem a função de fornecer a tensão de alimentação aos circuitos auxiliares e controle, para dar início ao funcionamento do gerador de ozônio, esta fonte auxiliar fornece uma tensão de 12 V e 900 mA.

Em seguida, tem-se o bloco controle digital, proteções e sinalizações (DSC), que é o bloco inteligente do gerador de ozônio, este tem a função de controlar e monitorar todo o sistema, gerando os pulsos PWM para os conversores CC/CC, fazendo o fechamento da malha com ação PI, monitorando o nível de tensão da rede elétrica, monitorando e controlando os níveis de

temperatura, temporizando o relé de corrente *inrush* e fornecendo os sinais visuais e sonoros locais da condição atual do gerador de ozônio.

Os blocos “*Drive*” possuem a função de fornecer a tensão e corrente necessárias para colocar os *mosfets* em condução, e no caso do conversor *buck*, isolar os pulsos PWM.

O bloco “Adeq. Nível” tem a função de reduzir o nível de tensão das baterias de 36 V para 12 V, atuando apenas nos casos de falta de rede elétrica, com o sistema operando em conjunto com um banco de baterias ou no caso de utilização apenas com sistema fotovoltaico, uma vez que nesta situação o conversor CA/CC está desligado. Nesta condição, o bloco DSC recebe o sinal de falta de rede elétrica e desabilita o sinal PWM de chaveamento do conversor *buck*.

No caso de instalação com energia solar, o bloco Painel Fotovoltaico é o responsável pela manutenção de carga das baterias, mantendo-as em carga ou flutuação durante todo o período de sol.

O bloco Controlador de Carga é responsável pelo monitoramento e controle dos níveis de carga das baterias, desconectando os painéis das baterias em caso de carga completa e desconectando a bateria do sistema em caso de descarga a um determinado nível, evitando assim uma descarga profunda das mesmas e garantindo sua vida útil. A utilização do controlador de carga em sistemas de energia solar é essencial para a vida útil das baterias e funcionamento correto do sistema.

O bloco Banco de Baterias é composto por três baterias de 12 V ligadas em série, totalizando 36,6 V, a capacidade de fornecimento de corrente é projetada de acordo com o consumo do sistema e autonomia requerida, após isto, deve-se então dimensionar os painéis solares para satisfazer a carga das mesmas, conforme será descrito no capítulo 3.

É importante ressaltar que é opcional a utilização do sistema solar, sendo uma solução para tratamentos em regiões remotas onde a rede elétrica não está disponível, podendo o sistema operar somente com rede elétrica, com energia solar ou ambos. Outra opção de instalação com presença de rede elétrica seria a retirada dos painéis fotovoltaicos e controlador de carga e utilizar um carregador de baterias, ou então, a tensão de saída do conversor *buck* (desde que possua

potência para isto), para manter as baterias carregadas, para funcionamento em caso de falha na rede elétrica, reduzindo os custos de instalação.

O sistema gerador de ozônio possui ainda um *timer*, onde o usuário efetua a programação como queira, fazendo o acionamento e parada do sistema de forma automática, sem a necessidade de intervenção humana. Pode-se programar os dias e intervalos de operação, suportando até 5 programações diferentes.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este estudo teve como objetivo geral o desenvolvimento de um protótipo de um sistema gerador de ozônio, considerando sua modelagem e análise, suas características e aplicações, utilizando e integrando novas tecnologias relacionadas a controle de processos, eletrônica de potência, analógica, digital, microcontroladores, processadores digitais de sinais (DSP), controladores digitais de sinais (DSC) e energias renováveis na busca de obter um sistema estável, compacto, com alto rendimento e automatizado. Além disso, o sistema desenvolvido poderá ser utilizado em locais onde existe energia elétrica disponível por meio de uma fonte e também em locais onde não existe energia elétrica disponível, neste caso, sendo alimentado por meio de painéis fotovoltaicos que terão a função de manter um banco de baterias carregado, para este alimentar o sistema por meio de uma tensão CC de 36,6 V. Para validação do protótipo desenvolvido serão realizados ensaios de tratamentos de efluentes e ensaios de conservação de alimentos, assim como a análise dos resultados obtidos.

1.2.1 Objetivos Específicos

São considerados para o estudo, os seguintes objetivos específicos:

- Modelagem e desenvolvimento de uma câmara de descarga elétrica (reator de ozônio) possuindo a forma geométrica cilíndrica, ou seja, sistema de

dois cilindros coaxiais metálicos com dielétrico, onde será gerado o gás ozônio por meio do efeito corona.

- Montagem de um protótipo com fonte convencional (baixa frequência) sem controle PI, para validação do reator.
- Modelagem dos conversores *buck*, *flyback* e controle PI analógico e digital com DSC.
- Montagem do protótipo com conversores e controles analógico e digital modelados.
- Teste dos conversores e comparação de desempenho dos controles analógico e digital com relação à estabilidade e tempo de resposta.
- Ensaio de produção de ozônio pelo método iodométrico.
- Ensaio de tratamento de efluentes.
- Ensaio de conservação de alimentos.
- Análise dos resultados e eficácia dos tratamentos realizados.

1.2.2 Considerações Complementares

Conforme literatura consultada, considera-se que os processos oxidativos de ozonização são mais eficientes em relação ao cloro para desinfecção de águas, oxidando algas, microorganismos contaminantes, matéria orgânica, além do ferro e do manganês e ainda não muda as propriedades da água, sendo muito utilizado atualmente para: água potável, água de resfriamento e/ou processo, efluentes industriais, com alto teor de orgânicos (ind. química, alimentícia, farmacêutica, celulose e papel, têxtil, etc.), redução de cor, odor, NOX, água mineral (enxágue de desinfecção de reatores, tanques e garrafas), lavagem CIP a frio, processos de lavagem e desinfecção de frutas, verduras, carnes, etc., tratamento de lixívia e chorume, uso em lavanderias industriais, processos de branqueamento, processos de síntese, limpeza de piscinas, uso odontológico e medicinal, entre outros.

Para cada objetivo e em relação ao sistema de geração de ozônio proposto, diferentes considerações foram formuladas. Neste sentido, pode-se afirmar que a presente pesquisa está baseada nas seguintes considerações:

- Tem-se como novas tecnologias o uso de DSC para o controle digital, sinalizações e proteções de etapas de potência em eletrônica, assim como a técnica de chaveamento em alta frequência com dispositivos semicondutores de última geração aplicados nos conversores.
- Utilização de energia solar como uma fonte de energia alternativa.
- Ótima estabilidade do conversor oferecida pelo controlador PI.
- Titulação pelo método iodométrico sendo eficiente na quantificação de ozônio gerado.
- Controle digital por DSC tendo resposta mais rápida em relação ao analógico devido operação em tempo real.
- Utilização de um *timer* digital programável facilitando a operação do sistema em determinadas aplicações.
- Geometria cilíndrica do reator sendo eficiente de acordo com a literatura.

1.2.3 Justificativa

A água cobre aproximadamente 70% da superfície do planeta, representando uma massa total de $2,65 \cdot 10^{14}$ toneladas. Desse total, apenas 0,5% representa água doce explorável sob o foco social, tecnológico e econômico, podendo ser extraída de lagos, rios e aquíferos. Subtraindo o percentual de água doce explorável, que se encontra em locais de difícil acesso ou muito poluídas, resta para consumo direto, apenas 0,003% do volume total de água do planeta (BRAGA et al., 2002).

Estima-se que, no Brasil, 60% das internações hospitalares estejam ligadas diretamente com a precariedade dos sistemas de saneamento básico e que 90% dessas doenças é resultado do abastecimento de água em quantidade e qualidade insatisfatória. Em muitas regiões brasileiras, é comum o abastecimento de água que não atende o padrão de potabilidade vigente. A água de má qualidade pode veicular doenças como a febre tifóide e paratifóide, cólera, disenteria bacilar e a hepatite infecciosa, entre outros (DI BERNARDO et al., 2002).

A preocupação crescente com a deterioração do meio ambiente, principalmente a respeito dos subprodutos gerados das reações do cloro com a matéria orgânica, a formação de subprodutos potencialmente prejudiciais aos seres humanos e organismos aquáticos e a crescente presença de moléculas resistentes ao tratamento biológico convencional, estão tornando as tecnologias alternativas de tratamento de água e esgoto atraentes. Assim, o ozônio reaparece como uma fonte alternativa de tratamento, promovendo a retomada de pesquisas de tecnologia em geração e a consequente operação econômica.

Em estações de tratamento de água que empregam exclusivamente o processo de cloração, a formação de organoclorados (trihalometanos), subprodutos indesejáveis, pode ocorrer na fase de pré-tratamento. O processo de ozonização, em função de sua baixa ação residual, tem sua principal aplicação nesta etapa. Outra atuação importante do ozônio é como agente na remoção de cor e turbidez da água.

Em estações de tratamento de esgotos domésticos, o ozônio também é bastante atrativo por não deixar resíduos danosos ao meio ambiente e ser altamente oxidante da matéria orgânica.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo visa colocar o problema, definir os objetivos a serem alcançados, delinear a metodologia a ser empregada para atingir os objetivos, bem como sua contribuição científica.

O segundo capítulo refere-se à revisão bibliográfica de conceitos básicos sobre o gás ozônio, suas características, aplicações, métodos de obtenção deste gás, métodos de determinação de ozônio no ar e na água, sensores eletrônicos para medição de concentração de ozônio, tipos de fontes de alimentação e estratégia de controle digital.

No capítulo três, encontra-se a metodologia adotada para modelagem de cada parte do gerador de ozônio proposto, assim como uma visão geral do equipamento, modelagem do reator, modelagem do conversor *buck*, modelagem dos circuitos de controle analógico e digital, modelagem do conversor *flyback*,

acessórios do equipamento, instalação, equacionamento do Venturi, metodologia para titulação pelo método iodométrico e metodologias de aplicações de tratamentos efluentes, alimentos e piscinas.

Os capítulos quatro e cinco apresentam os resultados obtidos, referentes ao reator, conversores *buck* e *flyback*, estratégias de controle, proteções e sinalizações, resultados de produção de ozônio do gerador proposto e de tratamentos realizados.

O sexto capítulo apresenta as considerações finais e conclusões obtidas a partir do protótipo desenvolvido, assim como as publicações obtidas com este trabalho.

Anexo, estão documentados todos os esquemas elétricos completos de cada etapa do sistema.

1.4 Principais Contribuições do Trabalho

O presente trabalho visou essencialmente contribuir cientificamente com o desenvolvimento de geradores de ozônio, utilizando novas tecnologias relacionadas à eletrônica, visando uma produção de ozônio contínua e estável, em concentrações pré-definidas pelo usuário para aplicações em geral.

A divulgação de resultados de pesquisas de aplicações de ozônio em diversas áreas, assim como a elaboração de um referencial teórico atualizado sobre ozônio e suas aplicações.

A aplicação de um novo dispositivo eletrônico programável (DSC) efetuando todo o controle, proteções e sinalizações do gerador de ozônio, difundindo a técnica de controle digital por controladores digitais de sinais, visto a escassez de materiais didáticos disponíveis nesta área.

O projeto traz como inovação a utilização de conversores CC/CC chaveados em alta frequência nos geradores de ozônio, eliminando assim os enormes e pesados transformadores de baixa frequência, possibilitando a construção de um gerador potente, compacto e com alto rendimento e estabilidade devido controle PWM digital em malha fechada com ação PI.

A inovação do sistema de controle fica por conta de um controlador digital de sinais (DSC) para o controle digital dos conversores CC/CC, proteções e

sinalizações do sistema gerador de ozônio, utilizando um dsPIC30F2010 fabricado pela Microchip, possibilitando um processamento em tempo real e um controle em malha fechada com ação PI, desta forma proporcionando uma geração de ozônio estável na saída do gerador. A utilização de um dispositivo programável proporciona a redução de circuitos analógicos para o controle, sinalização e proteção, eliminando o risco de possíveis falhas de tais componentes, reduzindo a complexidade e custos das placas eletrônicas, porém exigindo conhecimentos em programação.

O controle em malha fechada juntamente com a utilização do DSC possibilita uma faixa de ajuste de concentrações de ozônio pré-definidas pelo usuário para aplicações em geral, digitalmente via programação do DSC ou ainda analogicamente por meio do ajuste do sinal de realimentação via potenciômetro, alterando assim a largura do pulso PWM, desta forma aumentando ou diminuindo o nível de tensão aplicado no reator e proporcionalmente a concentração de ozônio gerado, fornecendo economia no consumo de energia elétrica, ao contrário dos geradores convencionais, que para variar a concentração de ozônio na saída é necessário alterar a vazão do gás alimentador, continuando o mesmo consumo de energia anterior.

O sistema apresenta também como inovação a possibilidade de utilização do gerador para tratamentos de águas, efluentes, sanitização, lavagem de frutas, verduras e vegetais no local da colheita para melhor conservação e outras aplicações em regiões remotas, onde não existe energia elétrica disponível, utilizando assim o sistema de energia solar proposto ou simplesmente baterias, podendo ser utilizado de forma automática por meio da programação prévia do *timer* acoplado no sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ozônio

A palavra ozônio vem do grego *ozein* que quer dizer mau cheiro. O significado do nome reflete uma de suas características, ou seja, o forte odor que exala quando em alta concentração. Esta característica foi observada pela primeira vez em 1785, por Van Marums, próximo a uma descarga elétrica produzida por sua máquina eletrostática. O odor característico foi inicialmente identificado pelo cientista alemão Christian Friedrich Schoenbein, como sendo de um composto indeterminado em 1840, conforme figura 2, durante a oxidação lenta do fósforo branco e da eletrólise da água. A identidade e estrutura deste composto foram confirmadas em 1867 como oxigênio triatômico (Prestes, 2007).



Figura 2. História do ozônio
(Fonte: *O3R The Ozone Way*, 2011)

O ozônio (O_3) é um gás formado por três átomos de oxigênio. Dois átomos de oxigênio constituem a base da molécula do oxigênio presente no ar. O terceiro átomo, muito instável, pode se desligar facilmente do ozônio para se ligar a moléculas de outras substâncias orgânicas, alterando sua composição química.

A habilidade do ozônio para desinfecção de água foi descoberta em 1886 e em 1891. Testes piloto já eram realizados em Martinkenfelde, na Alemanha. No

entanto, a primeira instalação de ozônio em escala industrial ocorreu em 1893, em Oudshoorn, na Holanda, objetivando a desinfecção de água na estação de tratamento de água potável desta cidade. Passou a ser utilizado comercialmente em 1903 para tratamento de água potável (Okte Engenharia e Consultoria, 2011).

A evolução da utilização do ozônio é descrita também pelo Instituto Nacional de Preservação Ambiental. Até 1914 o número de estações de tratamento de água utilizando ozônio cresceu significativamente e na Europa já havia pelo menos 49 instalações. O crescimento da utilização do ozônio caiu muito na época da primeira guerra mundial, quando pesquisas relacionadas a gases venenosos, levaram a descoberta do cloro, que do ponto de vista econômico era mais vantajoso. Mesmo assim, o número de instalações de ozônio continuou crescendo, principalmente na Europa, e em 1936 já havia aproximadamente 100 instalações na França e 140 no mundo (Okte Engenharia e Consultoria, 2011).

O desenvolvimento de tecnologias muito econômicas de produção de ozônio em baixas concentrações (geração de ozônio em lâmpadas de luz ultravioleta) fez com que fosse retomado o interesse por sua aplicação.

Atualmente, o ozônio é conhecido como o segundo mais poderoso agente oxidante que pode ser utilizado em escala para aplicações em tratamento de água e vem sendo adotado por diversos países e em milhares de sistemas de tratamento.

No Brasil, a utilização do ozônio começou em 1983 devido à necessidade de alternativas para os métodos convencionais de pré-cloração e pré-aeração no tratamento de águas superficiais. A partir de 1985, o setor industrial também iniciou o uso do ozônio com a aquisição de equipamentos e procedimentos laboratoriais.

Ozônio é um gás que vem sendo aplicado em grande escala em nível mundial, devido às inúmeras vantagens. Por ser um poderoso agente oxidante, a utilização do ozônio deve ser feita de uma forma correta e com as devidas precauções, desde o momento de sua geração até o fim de sua aplicação.

A formação natural do ozônio acontece durante as tempestades, quando ocorrem relâmpagos nas proximidades da crosta terrestre. A descarga elétrica dissocia a molécula de oxigênio em dois átomos de oxigênio. Estes átomos

instáveis têm excesso de elétrons que combinam-se com outras moléculas de oxigênio, em um menor estado de energia. Esta combinação forma o ozônio (O₃).

O ozônio é um gás que possui uma meia vida relativamente curta (cerca de 15 minutos, à pressão atmosférica e temperatura de 25 °C), inviabilizando assim o seu armazenamento. Por razões práticas, necessita ser gerado no local de sua aplicação, tendo um alto poder de desinfecção e oxidação sendo altamente solúvel em água. A solubilidade do O₃ é afetada pela temperatura, pressão e a presença de contaminantes.

Nos geradores comerciais, o ozônio é produzido principalmente por Efeito Corona e radiação ultravioleta (UV). A radiação UV, todavia, não atende as necessidades de produção requeridas pela indústria. Assim a descarga elétrica do tipo Corona é o método mais utilizado para se obter ozônio, em quantidades significativas.

De acordo com a tabela 1, o ozônio é o segundo oxidante mais poderoso, excedido em seu potencial de oxidação somente pelo flúor. É poderoso contra germes e vírus, sua concentração máxima considerada segura para o homem é da ordem de 0,1 ppm.

Tabela 1. Comparação de agentes oxidantes

Agente Oxidante	Potencial de Oxidação (V)	Poder Relativo de Oxidação
Flúor	3,06	2,25
Ozônio	2,07	1,52
Peróxido Hidrogênico	1,77	1,30
Ácido Hipocloroso	1,49	1,10
Cloro	1,36	1,00

(Fonte: *Snatural*, 2011)

Este elevado potencial de oxidação faz com que ele reaja rapidamente com uma grande variedade de compostos.

Em geral pode-se dizer que o ozônio é a união de uma molécula de oxigênio com um átomo do mesmo elemento. A maneira mais simples de se obter um átomo de oxigênio é por meio da dissociação de sua molécula. A molécula de oxigênio é composta por dois átomos unidos por uma dupla ligação covalente. O átomo de oxigênio tende a se agrupar com outra molécula do mesmo elemento gerando assim o ozônio, conforme apresentado na figura 3.

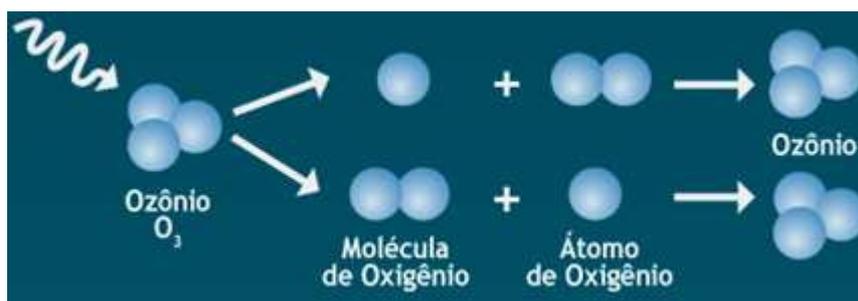


Figura 3. Formação do ozônio
(Fonte: *O3R The Ozone Way*, 2011)

Comparado ao cloro, o ozônio oferece muitas vantagens no processamento de alimentos e bebidas e na sanitização de materiais e superfícies. O cloro tem sido utilizado como produto de primeira escolha na indústria de alimentos, no entanto sabe-se que muitos subprodutos são derivados da ação oxidante do Cloro, como a formação de THM (*trihalometanos*), cloraminas, dioxinas que são produzidas na reação de cloro com matéria orgânica. Estas substâncias são carcinogênicas (*O3R The Ozone Way*, 2011).

As tabelas 2 e 3 apresentam comparações entre o cloro e o ozônio.

Tabela 2. Comparação entre ozônio e cloro

Ozônio	Cloro
Em contato com outros compostos, se dissocia a oxigênio	Em contato com proteínas, gera compostos orgânicos clorados (cloraminas), substâncias que contaminam o meio ambiente e são cancerígenas aos humanos
Não causa alergia ou irritações e não descolore roupas e piscinas de vinil	No tratamento de piscinas causa problemas como irritação nos olhos, pele e descoloração de roupas
O ozônio é um excelente desodorizador, despolarizador e clarificador	Deixa odor, gosto e coloração branca na água
Não deixa resíduo	Gera compostos tóxicos, chamados trihalometanos
Não necessita de transporte ou consome insumos, é produzido no local	Necessidade de adquirir e transportar produtos químicos perigosos
Processo natural	Processo químico

(Fonte: *O3R The Ozone Way*, 2011)

Tabela 3. Comparação de ações entre ozônio e cloro

Ação	Cloro	Ozônio
Odor	Desagradável	Típico (desaparece com o tempo)
Sabor	Desagradável	Nenhum
Cor	Tende ao Amarelo	Cristalino
Atividade Antiviral	Nenhuma	Elevada
Atividade Antibacteriana	Variável	Amplio Espectro
Atividade Destrutiva Sobre Algas e Protozoários	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Fungos	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Esporos e Cistos	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Moléculas Orgânicas	Nenhuma	Elevada
Efeito do pH	Variável	Diminui
Cancerígeno	Provável	Improvável
Remoção de Cor	Boa	Excelente
Meia Vida na Água	2-3 horas	20 min
Complexidade	Baixa	Alta
Custo Mensal	Moderado-Alto	Baixo
Custo Capital	Baixo	Alto
Toxicidade de Inalação	Alta	Alta

(Fonte: *O₃ technologies*, 2011)

O gás ozônio é reconhecido oficialmente como agente sanitizante seguro de alimentos. Segue características físico-químicas do ozônio: (Cerva, 2003)

- Fórmula química O_3
- Massa molar 48 g/mol
- Massa específica do gás (CNTP) 2,14 g/L
- Ponto de fusão (a 1 atm) $-192,5^{\circ}C$
- Ponto de ebulição (a 1 atm) $-111,9^{\circ}C$
- Temperatura crítica $-12,1^{\circ}C$
- Pressão crítica 5.460 kPa (abs)
- Densidade crítica 540 kg/m^3
- Solubilidade em água, vol/vol a $0^{\circ}C$ 0,64
- Meia vida em água a $20^{\circ}C$ 20 min

A -112°C , o ozônio puro condensa na forma de um líquido azul escuro que explode facilmente. Misturas menos concentradas de oxigênio-ozônio (ozônio acima de 20%) também são explosivas, tanto no estado líquido quanto vapor.

2.2 Mecanismo de Ação do Ozônio

O que diferencia o ozônio de outros sanitizantes é o seu mecanismo de destruição dos microrganismos. Enquanto o cloro atravessa a membrana celular, agindo sobre elementos vitais (enzimas, proteínas, DNA e RNA) no interior da célula, o ozônio degrada primariamente a estrutura da membrana, conforme ilustrado na figura 4, inativando os microrganismos em menor tempo de contato e inviabilizando sua recuperação.

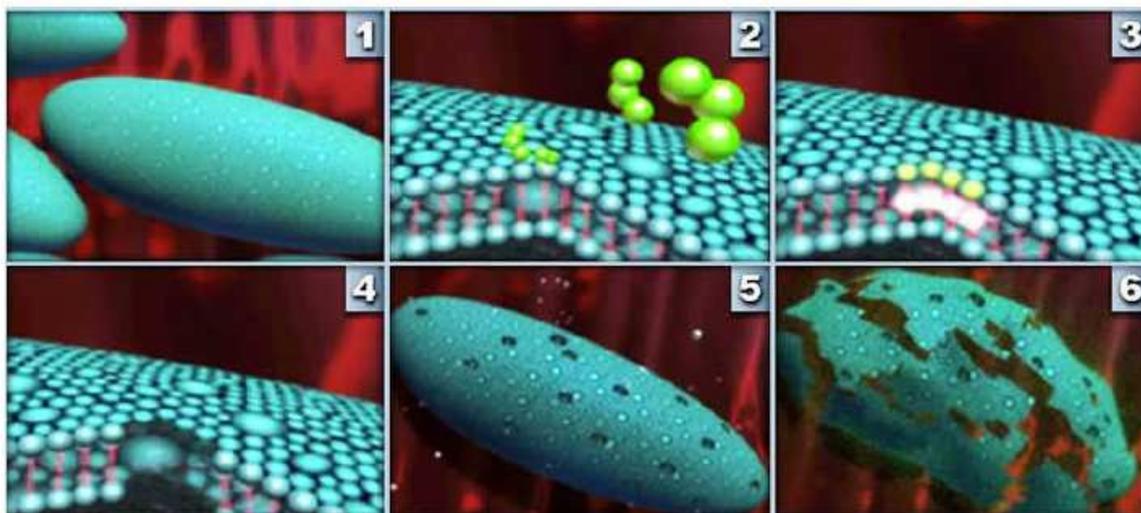


Figura 4. Simulação computacional da degradação de membrana bacteriana
1. Bactéria sadia; 2. Membrana da bactéria sendo atacada pelo O_3 ;
3. Oxidação da membrana da bactéria; 4 a 6. Ruptura e destruição da bactéria. (Fonte: *Snatural*, 2011).

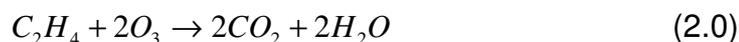
A ação antimicrobiana do ozônio é decorrente do ataque por meio da oxidação dos glicolípídios, glicoproteínas e aminoácidos da parede e membrana celulares microbianas, alterando a permeabilidade celular e causando sua rápida *lise* e inibição da atividade respiratória e reprodutiva dos microrganismos.

Secundariamente, ataca também grupos sulfidríla de enzimas, ocasionando o colapso da atividade enzimática celular, altera as cadeias polipeptídicas da cápsula protéica de alguns vírus e, em sequência, as bases púricas e pirimidínicas do seu RNA (Kim, 1999).

O ozônio possui capacidade de inativar numerosas bactérias, incluindo gram-negativas e gram-positivas, células vegetativas e esporos, além de componentes do envelope celular, esporos ou cápsulas virais, em concentrações relativamente baixas e em reduzido tempo de contato (Kim, 1999). Estudos mostram que o caráter fortemente oxidante e não seletivo do ozônio lhe confere pronta atuação contra diferentes espécies de microrganismos.

Adicionalmente, o O_3 possui capacidade de neutralização do etileno produzido durante os processos de amadurecimento e decomposição de algumas frutas, tais como kiwi e maçã, que a estocagem em câmara fria por si só não consegue deter.

De forma geral, a degradação do etileno pelo ozônio gasoso ocorre segundo a fórmula abaixo:



Entretanto podem ocorrer reações intermediárias, em menor escala e transitórias, onde há formação de formaldeído e monóxido de carbono.

2.3 Toxicidade do Ozônio para o Ser Humano

A grande preocupação devido à exposição ao ozônio acontece quando há vazamento de ozônio no ambiente onde as pessoas estão trabalhando. Isto pode acontecer em caso de instalação mal realizada ou utilização de materiais que podem ser degradados pelo ozônio como, por exemplo, a borracha. Se o ozônio for detectado no ambiente de trabalho, a primeira ação deve ser desligar o aparelho gerador de ozônio, cessando imediatamente a produção do gás. Também podem ser instalados sensores de ozônio no ambiente de trabalho, que

em caso de detecção de ozônio, executam o desligamento do aparelho e o acionamento de ventiladores e exaustores.

A figura 5 mostra várias concentrações/tempo de exposição humana e as respostas ao ozônio.

A exposição a níveis de ozônio na atmosfera abaixo de 1 ppm, durante 10 minutos não é sintomática. A exposição a níveis de 100 ppm para 10.000 minutos, ou a 10.000 ppm por 30 segundos, pode ser fatal. Normalmente, humanos podem detectar ozônio no ar ambiente em níveis de cerca de 0,1 ppm.

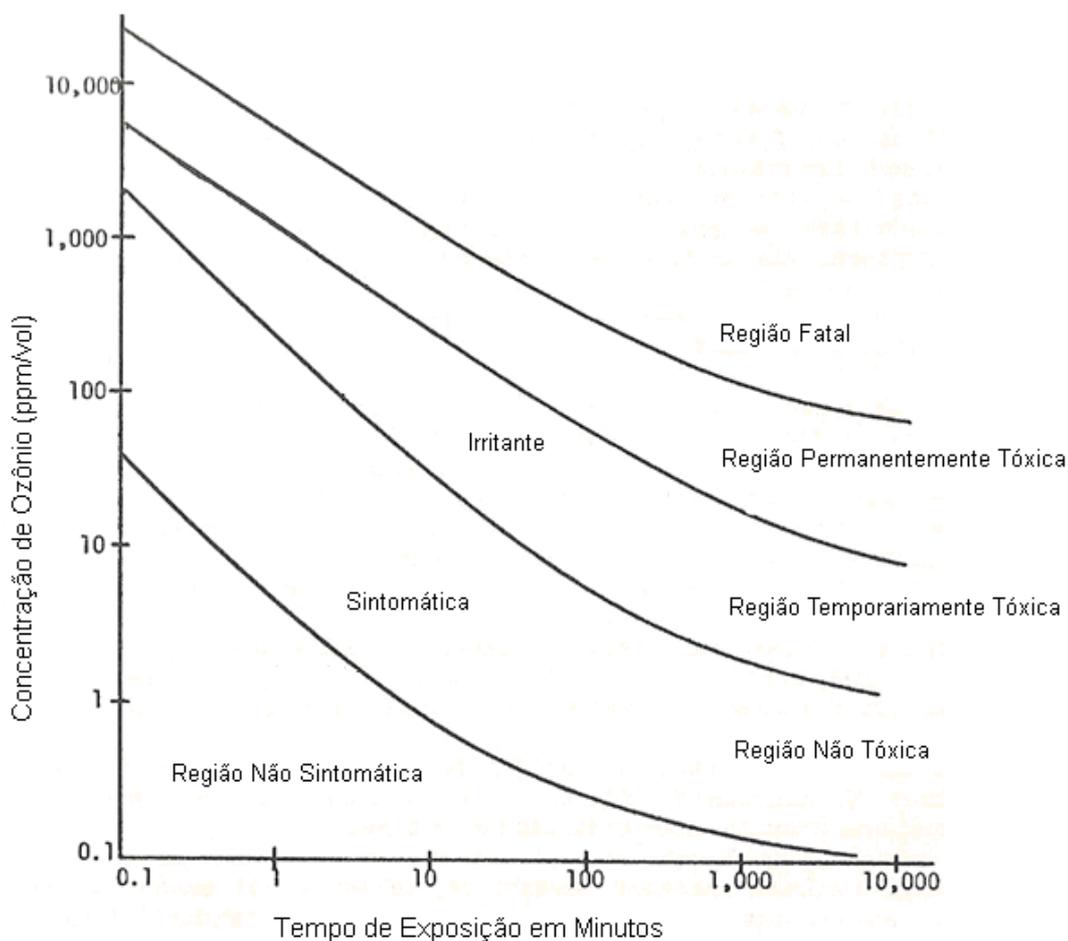


Figura 5. Relações de concentração/tempo entre a exposição ao ozônio e a resposta humana
(Fonte: Rice et al, 1986)

Bollyky (1978) discutiu os efeitos biológicos da exposição humana a níveis de ozônio e tempos de exposição nas zonas sintomático da figura 5. Estes efeitos incluem o aumento de resistência ao fluxo pulmonar, diminuição da capacidade

de difusão de monóxido de carbono e diminuição da elasticidade pulmonar (Rice et al, 1986).

A exposição de 1,5 a 2 ppm de ozônio durante duas horas produz secura da boca e garganta, dores no peito tipo constritiva, diminuição da capacidade mental, dificuldade na coordenação e articulação, perda de apetite, tosse e perda de 13% da capacidade vital. No entanto, a recuperação destes sintomas é normalmente completa dentro de um a 14 dias.

A inalação de ozônio produz alterações enzimáticas no sangue, fragiliza a membrana dos glóbulos vermelhos e causa oxidação de ácidos graxos insaturados. Citopatologicamente, nenhuma aberração cromossômica tem sido observada e não existem evidências de efeitos cancerígenos, mutagênicos ou teratogênicos ou efeitos sobre a reprodução. A exposição ocupacional ao ozônio causa irritação dos olhos, nariz e garganta, tosse, dores de cabeça, letargia, com dor e edema pulmonar após uma exposição severa. Além disso, tem sido observada ligeira diminuição da visão noturna após exposição ao ozônio (Rice et al, 1986).

O órgão estadunidense que trata da saúde e da segurança ocupacional, *Occupational Safety and Health Association* (OSHA), estabelece os limites de exposição curta e longa ao ozônio (TLV-STEL e TLV-LTEL) no ambiente de trabalho. Os limites variam de 0,01 mg/L de ar para uma jornada de trabalho de 8 horas diárias (40 horas semanais) a 0,3 mg/L de ar por 15 minutos, para uma utilização segura do gás (Nascimento et al., 2005).

A prevenção da intoxicação profissional pode ser obtida evitando a exposição das pessoas que sofrem de infecções ou outras doenças de vias respiratórias. Vários países fixaram o TLV (*Threshold Limit Value*) de 0,1 ppm de ozônio, para um período de quarenta horas por semana, e valor limite para tempo de exposição de 10 minutos igual a 0,3 ppm (Bassani, 2003).

Para baixas concentrações de ozônio, até 5 ppm, o uso de máscara filtrante será suficiente. Ela deve cobrir toda a face, a fim de proteger os olhos da ação irritante do ozônio. Como medida de precaução, o emprego da máscara filtrante deve ser previsto para usos de curta duração, da ordem de até 30 minutos. Para teores maiores que 5 ppm, e/ou para exposições mais prolongadas, é preciso empregar aparelhos respiratórios autônomos, nos quais a máscara é alimentada por oxigênio comprimido (Bassani, 2003).

2.4 Estabilidade do Ozônio

No estado gasoso, o ozônio tem relativamente uma longa meia-vida (cerca de 12 horas em atmosfera ambiente), mas em solução aquosa a meia-vida é muito curta. Há indicações na literatura, que o ozônio tem 20 minutos de meia-vida na água destilada.

A figura 6 compara a meia-vida do ozônio em água bidestilada, água destilada, água da torneira, água subterrânea e duas águas de lagos filtradas, todos medidos em 20°C.

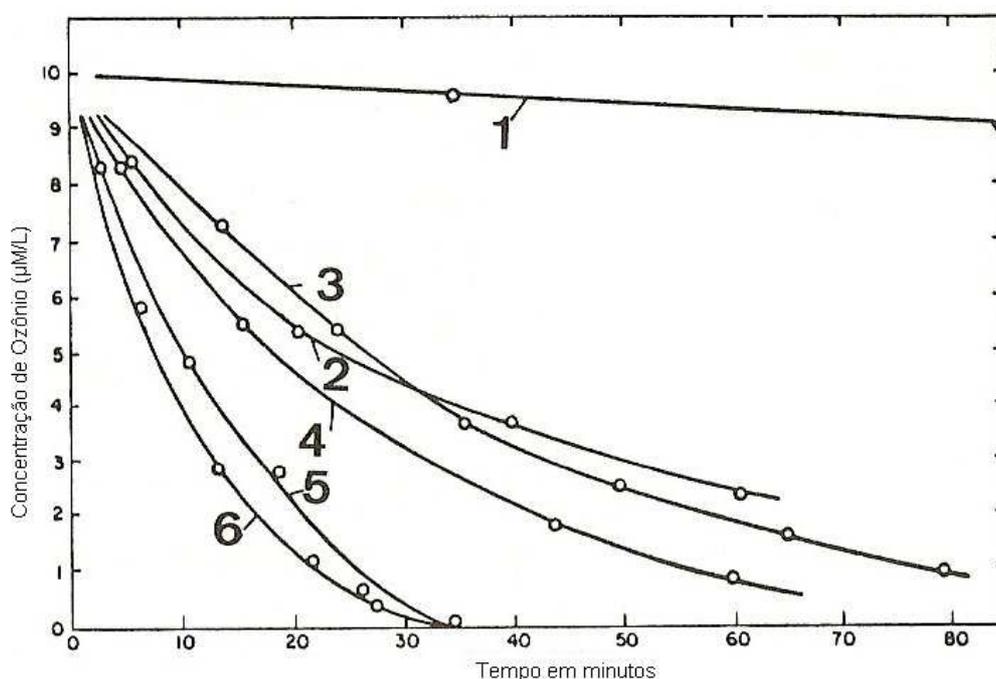


Figura 6. Taxas de decomposição do ozônio em vários tipos de água a 20°C
 1 = água bidestilada, 2 = água destilada; 3 = água de torneira, 4 = águas subterrâneas de baixa dureza, 5 = água filtrada do Lago de Zurique, 6 = água filtrada do Bodensee (Fonte: Rice et al, 1986)

Pode ser visto que a meia-vida do ozônio na água pode variar de cerca de 10 minutos nas águas do lago, para mais de uma hora em água bidestilada.

Por causa da instabilidade inerente do ozônio, não pode ser comprado e armazenado até que esteja pronto para o uso como podem outros oxidantes/desinfetantes empregados atualmente. Em vez disso, é gerado no local, perto de seu ponto de uso, como é exigido.

2.5 Solubilidade do Ozônio na Água

A dissolução gasosa em líquidos é regida por uma lei conhecida como Lei de Henry. Essa lei diz que a solubilidade de um gás em água depende da pressão parcial do gás exercida sobre o líquido. A constante de proporcionalidade utilizada nessa lei varia com o gás e a temperatura, e recebe o nome de constante de Henry (Rice et al, 1986).

Expressa como uma equação:

$$Y = HX \quad (2.1)$$

Onde, Y = Pressão parcial do gás acima do líquido (mmHg)
 X = fração molar de equilíbrio do gás em solução (sua solubilidade)
 H = Constante da Lei de Henry, que varia com a temperatura

Os termos da equação 2.1 podem ser convertidos em unidades de concentração, tal que:

Y = Concentração de gás acima do líquido em equilíbrio com o gás dissolvido no líquido (mg/L)

X = Concentração do gás no líquido em equilíbrio com o gás acima do líquido (mg/L)

$$H = [\text{mg gás/L gás}] / [\text{mg gás/L líquido}]$$

Assim, a Lei de Henry, simplesmente expressa a concentração de gás acima do líquido que deve existir para uma dada concentração de gás a ser dissolvido no líquido. Quanto menor o valor de H , mais solúvel é o gás.

Após a conversão dos termos da Lei de Henry para unidades de concentração, Venosa e Opatken (1983) compararam a solubilidade do oxigênio e ozônio (gerados em uma concentração de 1% no ar) na água a temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C, conforme tabela 4. Lembrando que a magnitude da constante de Henry é uma função da temperatura e não de concentração (Rice et al, 1986).

Tabela 4. Solubilidade do ozônio e oxigênio em água de acordo com a Lei de Henry

Gás	Temp. (°C)	H mg gás/L ar / mg gás/L água	Y mg gás/L ar	X mg gás/L água
Oxigênio (ar)	0	20,4	299	14,6
	10	25,4	289	11,4
	20	29,9	279	9,3
	30	34,2	270	7,9
Ozônio (1,0 % em peso)	0	1,56	12,9	8,3
	10	1,86	12,5	6,7
	20	2,59	12,1	4,7
	30	3,80	11,7	3,1

(Fonte: Rice et al, 1986)

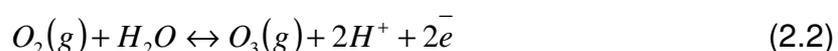
Os valores de H para o oxigênio na tabela 4 são os mesmos, se a concentração de oxigênio na fase gasosa é 21% (ar) ou 100% (oxigênio puro). Por meio dos dados fornecidos na tabela 4, fica evidente que o ozônio é aproximadamente 13 vezes mais solúvel que o oxigênio em temperatura e pressão padrão (H = 20,4 para o oxigênio e 1,56 para o ozônio) na faixa de temperatura apresentada.

2.6 Geração de Ozônio

O ozônio pode ser produzido de 3 formas principais: por eletrólise, radiação UV, e o efeito Corona (*Corona Discharge*), essas 3 formas são descritas a seguir.

2.6.1 Geração por Eletrólise

Na geração por eletrólise, o átomo de oxigênio, que forma o ozônio, é obtido da molécula de água por meio de uma reação eletroquímica.



Neste processo se emprega um eletrodo de alto potencial de liberação de oxigênio, normalmente formado por ligas de titânio.

2.6.2 Geração por Raios Ultravioleta

O ozônio é produzido naturalmente na estratosfera pela ação fotoquímica dos raios ultravioleta sobre as moléculas de oxigênio. Esses raios são suficientemente intensos para separar os dois átomos que compõe a molécula de O_2 , produzindo assim o oxigênio atômico.

A produção de ozônio é realizada numa etapa imediatamente posterior, resultando da associação de um átomo de oxigênio e uma molécula de O_2 na presença de um catalisador.



A dissociação da molécula de oxigênio pode ser obtida por meio da irradiação ultravioleta como ilustrado resumidamente na figura 7.

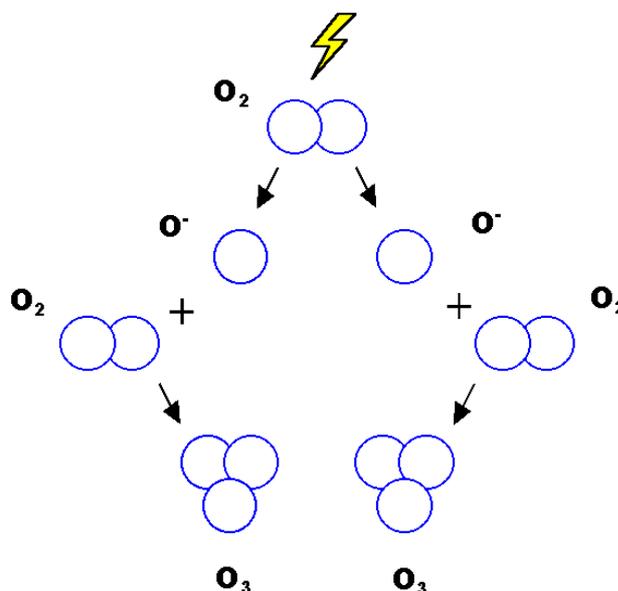


Figura 7. Geração de ozônio por UV
(Fonte: Valdameri, 2006)

Na geração por incidência de raios ultravioleta a produção do ozônio ocorre por um processo fotoquímico no qual a energia é fornecida pela luz. A quebra da ligação da molécula de oxigênio é fornecida por radiação ultravioleta com comprimentos de onda $\leq 242,2$ nm (Valdameri, 2006).

2.6.3 Geração por Efeito Corona

O método de descarga corona é o procedimento mais utilizado para gerar ozônio em escala industrial. Isto ocorre porque o processo de descarga corona produz as maiores concentrações de ozônio de acordo com o nível de energia elétrica aplicada.

A figura 8 apresenta um esquema de geração de ozônio por meio de descarga corona.

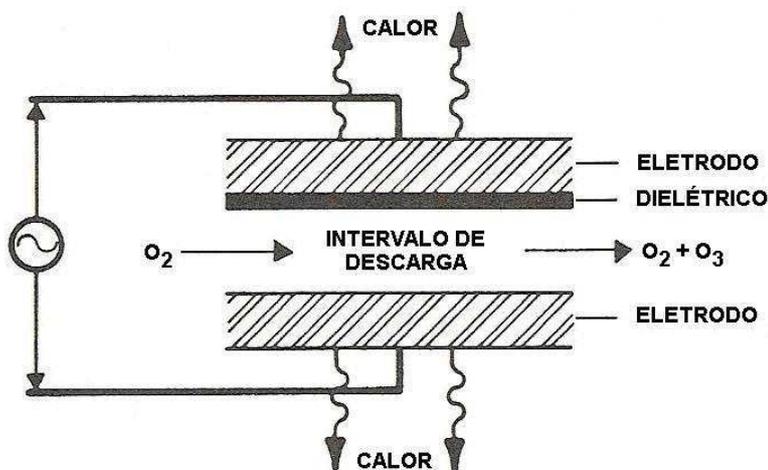


Figura 8. Esquema de geração de ozônio por efeito corona
(Fonte: Rice et al, 1986 - adaptada)

Conforme a figura 8, no processo do efeito Corona, o ozônio é gerado por uma descarga elétrica aplicada em um reator de ozônio (dois tubos concêntricos de inox separados por um meio dielétrico de cerâmica e uma abertura para passagem do gás aplicado), através destes tubos aplica-se uma descarga elétrica de alta tensão juntamente com um fluxo de ar seco, onde nestas condições, parte do oxigênio aplicado é convertido em ozônio, um gás com alto poder oxidante, o

que apresenta melhor eficiência é o produzido por oxigênio puro. A abertura intereletrodo é separada por um meio dielétrico para evitar a descarga completa.



A descarga elétrica tipo corona é um fenômeno característico que ocorre nas regiões de campos elétricos não uniformes de alta intensidade, principalmente nas pontas e bordas ou fios submetidos à tensão elétrica.

Se as correntes de descarga são:

- Relativamente altas: a descarga corona pode ocorrer na forma de uma descarga luminescente.
- Relativamente baixas: a descarga corona é denominada de descarga elétrica silenciosa, que é uma forma inaudível de descarga.

O efeito corona está representado na figura 9. Ao aplicar-se uma tensão que excede o potencial de ionização do material dielétrico, representado nesta figura pelo ar, os elétrons livres são impulsionados a alta velocidade, e rompem por meio do impacto as duplas ligações das moléculas de oxigênio presentes no ar.

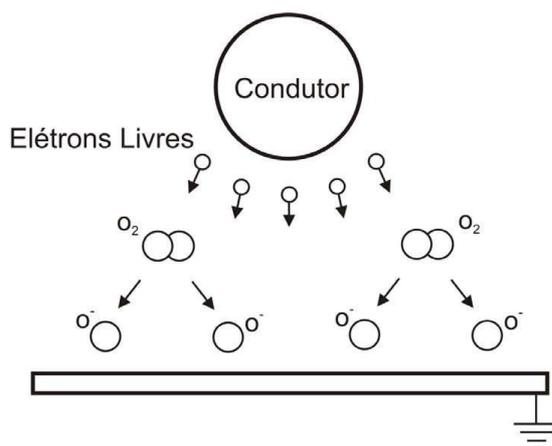


Figura 9. Processo de descarga corona
(Fonte: Valdameri, 2006)

A reação de geração de ozônio é iniciada quando os elétrons livres provenientes da descarga corona causam a dissociação das moléculas de oxigênio.



Os átomos de oxigênio se reagrupam, formando assim o ozônio.

Durante a geração de ozônio, uma quantidade considerável de calor é liberada, por isso é fundamental que o gerador seja adequadamente resfriado, a fim de maximizar a produção de ozônio. Isso normalmente é feito com água, mas pode ser feito também com ar.

Segundo Rice et al (1986), pelo processo de descarga corona, podem ser produzidas concentrações de 1% a 3% quando o gerador é alimentado com ar e 2% a 6% quando o gerador é alimentado com oxigênio puro.

Formas diferentes de descarga corona podem ocorrer dependendo da frequência e polaridade do campo (CA, CC) e da configuração geométrica dos eletrodos (Chang; Lawless; Yamamoto, 1991).

Sob tensão contínua CC, a descarga corona pode ser ainda classificada como positiva ou negativa. A seguir, nos itens 2.6.3.1 a 2.6.3.4 uma breve revisão do fenômeno físico envolvido no processo de descarga e sua relação com a produção de ozônio será apresentada.

A terminologia oficial para o termo corona é, segundo a NBR05456 (1987, p.68), "eflúvio que se manifesta em um campo elétrico não uniforme e de intensidade muito elevada, tendo uma parte visível perto do condutor".

Segundo Van Brunt (1994), o termo Corona é designado como uma descarga parcial entre eletrodos tipo ponta-placa que ocorre nos casos onde dielétricos sólidos estão ausentes ou estão muito afastados da zona de ionização ou de descarga.

2.6.3.1 Corona CC Negativo

Primeiramente, alguns mecanismos de ionização presentes neste processo serão examinados. Considere dois eletrodos tipo fio-cilindro dispostos de forma coaxial. Uma alta tensão CC negativa é aplicada no catodo (fio de diâmetro pequeno) e o anodo (cilindro de diâmetro grande) é aterrado. Faz-se passar pelo espaço intereletrodo um gás de característica eletronegativa (gás que tem afinidade na troca de elétrons) (Armaroli, 2007).

Sob condições normais de pressão e temperatura e com um campo elevado imposto entre os eletrodos, partículas carregadas (elétrons livres) existentes nos gases eletronegativos, são aceleradas pelo campo podendo ganhar energia e, a seguir, perdê-la por meio de colisões inelásticas (há troca de energia entre partículas que se chocam) com moléculas neutras do gás (Mukkavilli et al, 1988).

Neste intervalo, se a energia do elétron for suficientemente alta, pode ocorrer a ionização (formação de pares de íons, negativo (elétron livre) e positivo (átomo sem um de seus elétrons)) de moléculas do gás pela colisão destas. Se o campo for aumentado ainda mais, mais elétrons ganharão energia e novas colisões ocorrerão. Esse método de ionização iniciará o processo de multiplicação de elétrons na região de ionização e é conhecido como avalanche de elétrons (Gallo, 1977).

Durante o processo de desenvolvimento da avalanche em direção ao anodo, o catodo possui uma importante atribuição de fornecer elétrons para o início, manutenção e continuação deste processo (Kuffel; Zaengl, 1984).

Primeiramente, a superfície do catodo sofre um bombardeamento de íons positivos produzidos pelo deslocamento da avalanche. Ao mesmo tempo, alguns fótons são emitidos da avalanche em todas as direções. Então, fótons e íons positivos produzidos podem iniciar novas avalanches a partir da superfície do catodo. Isto só é possível, desde que a energia envolvida seja maior que a energia mínima necessária para remover um elétron da superfície do catodo (Kuffel; Zaengl, 1984; Abdel-Salam et al, 2000).

Nestas condições, o deslocamento de elétrons e íons negativos para fora do catodo e fótons e íons positivos para dentro torna-se auto-sustentado, correspondendo a pulsos de corrente corona regulares e repetitivos fluindo por

meio de um circuito de alta tensão (Abdel-Salam et al, 2000). Segundo (Van Brunt, 1994), um pulso Trichel pode ser visto como uma descarga com pulso de corrente associado a uma descarga de brilho transiente ou a uma descarga de brilho que tenta desenvolver-se, mas é extinta pela carga espacial acumulada nesta região.

Este fenômeno foi estudado profundamente por Trichel e foi nomeado de Pulso Trichel (Kuffel; Zaengl, 1984). A figura 10 mostra em duas escalas diferentes, a relação entre a frequência do pulso Trichel com a tensão aplicada.

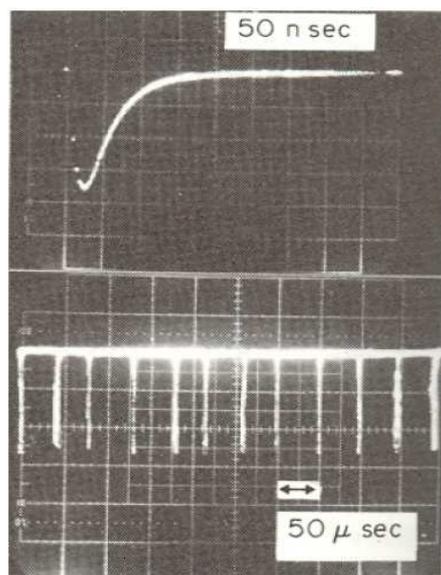


Figura 10. Frequência do pulso Trichel em duas escalas diferentes (Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984).

O mecanismo físico da descarga corona sob tensão CC negativa será investigado por meio da figura 11.

A disposição a seguir, é função da intensidade da tensão aplicada e da abertura do espaçamento entre os eletrodos.

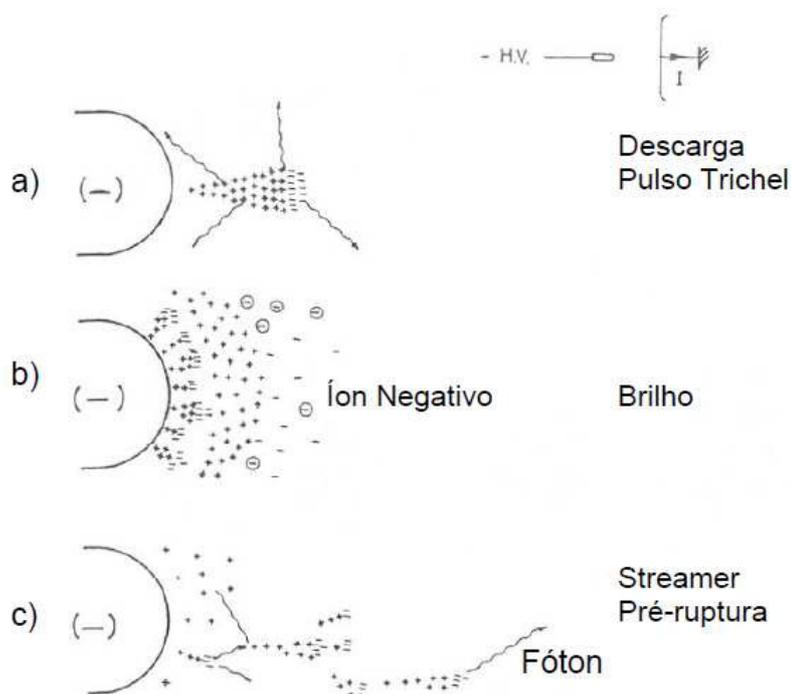


Figura 11. Desenvolvimento de avalanches de elétron em descargas corona negativas
(Fonte: Abdel-Salam et al, 2000)

Considere inicialmente, uma tensão aplicada com nível próximo do limiar de ionização.

Na figura 11-a, conforme a tensão é aumentada, os elétrons são afastados para a região de baixo campo. Os íons positivos deixados na trilha após a avalanche de elétrons possuem baixa mobilidade. Isto ocasiona o aumento no campo de ionização nesta região, provocando a retirada de elétrons da superfície do catodo pelo processo de bombardeamento (Gallo, 1977). Outros processos envolvidos na produção de elétrons secundários são a foto emissão do eletrodo de descarga e a fotoionização do próprio gás. (Chen, 2002).

Para um gás eletronegativo, os elétrons são absorvidos pelas moléculas do gás formando uma nuvem de íons de baixa mobilidade que bloqueiam a avalanche.

Isto persiste até o momento em que o campo elétrico afasta a nuvem de íons ainda mais longe da região de ionização e este recupera o seu valor crítico de ruptura reiniciando uma nova avalanche. O processo torna-se repetitivo formando os chamados pulsos Trichel (Gallo, 1977).

Para um nível maior de tensão, mais elétrons são gerados pelo catodo. Assim, devido à baixa mobilidade da nuvem de íons negativos, começa a ocorrer

um acúmulo da carga espacial positiva que permanece no espaço entre esta nuvem e o eletrodo catodo. O pulso Trichel aumenta então sua taxa repetitiva até o nível crítico onde a descarga corona adquire um modo de brilho estável sem pulsos (figura 11-b). A partir daí, a carga da nuvem de íons negativos já não é suficiente para bloquear completamente a ionização e, com um aumento um pouco maior da tensão, a região de ionização é praticamente extinta (Abdel-Salam et al, 2000; Gallo, 1977).

A figura 11-c mostra que o campo aplicado afasta do catodo a carga espacial de íons positivos e negativos. Ocorre aí uma intensa excitação das moléculas do gás gerando-se fótons em direção ao anodo. Estes, por fotoionização, formam elétrons que se movimentam rapidamente por avalanches secundárias criando canais de ionização chamados *streamers*. Este processo permanece até que, para um aumento ainda maior na tensão, ocorre o crescimento dos *streamers* que atravessam o espaçamento intereletrodo resultando na completa ruptura da abertura (Kuffel; Zaengl, 1984).

A representação gráfica dos fenômenos físicos ocorrentes neste arranjo pode ser verificada na figura 12 no qual curvas características de descarga corona e ruptura para uma configuração ponta-plano negativo no ar atmosférico são apresentadas.

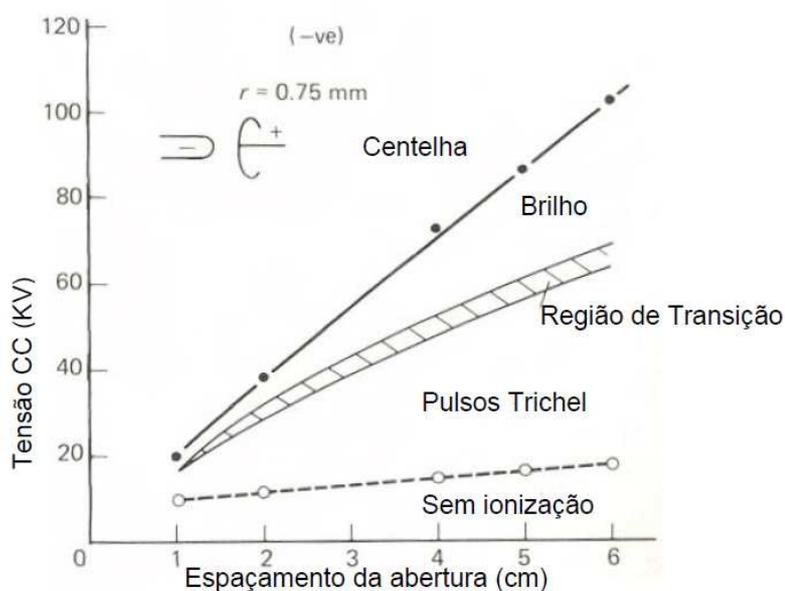


Figura 12. Características corona e ruptura em ponta-plano negativo no ar atmosférico
(Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984)

A curva tracejada fornece a tensão inicial para pulsos Trichel. Abaixo desta, nenhum fenômeno de ionização apreciável é identificado considerando espaçamento da abertura acima de 1 cm. Elevando-se a tensão, a forma dos pulsos não muda para uma ampla faixa de tensão e espaçamento. Então, para uma tensão maior, uma descarga de brilho estável tenta se formar, mas a transição dos pulsos Trichel para esta não é bem definida sendo representada por uma faixa de transição. Aumentando mais a tensão, aumenta a frequência do pulso Trichel até um nível crítico onde a descarga corona de brilho se estabelece. Aumentando a tensão ainda mais, a descarga de brilho corona se mantém constante até que ocorre a formação de canais de ionização que podem levar à ruptura completa (Kuffel; Zaengl, 1984).

Nota-se que a ruptura sob polaridade negativa ocorre em um nível muito elevado de tensão. Assim, pode-se obter descargas corona negativas bem mais intensas. Entre as curvas tracejada e contínua estabelece-se a região na qual os efeitos de descarga corona negativa apresentam-se quase constantes e sem resultar em ruptura. O processo aqui se realiza de maneira mais estável. Como exemplo, na figura 12, considerar o ponto de interseção entre os pontos 20 kV e 3 cm. Nesta configuração, já se tem a ocorrência de Pulso Trichel, ou seja, com este campo (6 kV/cm) já é possível trabalhar na região de descarga estabilizada.

Portanto, a partir destes estudos e da figura 12, conclui-se que esta região é útil para projeto e dimensionamento do espaçamento, pois de acordo com as distâncias, se aumentar muito a tensão, é necessário aumentar o espaçamento.

2.6.3.2 Corona CC Positivo

O mecanismo físico da descarga corona sob tensão CC positiva será investigado por meio da figura 13.

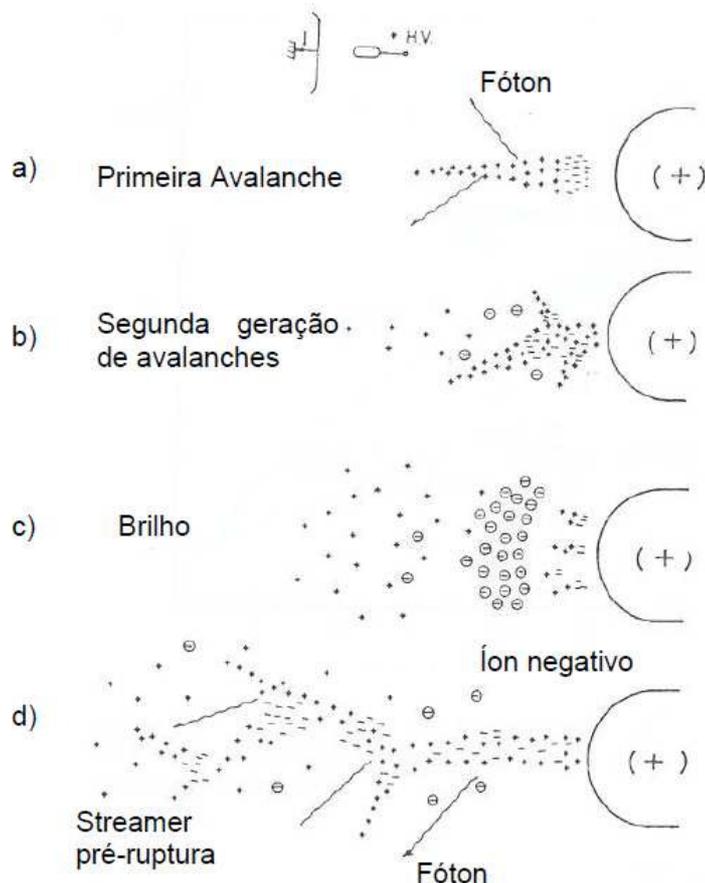


Figura 13. Desenvolvimento e geração de avalanches nas descargas corona positivas
(Fonte: Abdel-Salam et al, 2000)

Dois eletrodos tipo fio-cilindro são dispostos de forma coaxial. Sob condições normais de pressão e temperatura, uma alta tensão CC positiva é aplicada no eletrodo anodo (fio de diâmetro pequeno) e o eletrodo catodo (cilindro de diâmetro grande) é aterrado. A disposição, a seguir, é função da intensidade da tensão aplicada e da abertura do espaçamento entre os eletrodos. Faz-se passar pelo espaço intereletrodo um gás de característica eletronegativa. Considerar inicialmente, uma tensão aplicada com nível próximo do limiar de ionização.

Na figura 13-a, com o aumento da tensão, elétrons livres presentes no gás são acelerados pelo campo em direção ao anodo produzindo avalanches de elétrons que deixam um canal de íons positivos. Durante este período, fótons energéticos são emitidos pela avalanche e estes ionizam alguns átomos e moléculas do gás. Os novos elétrons criados são então acelerados para o anodo por meio de um canal de íons positivos lentos onde a região de ionização é elevada. Uma segunda geração de avalanches é formada criando canais adicionais de íons positivos. A figura 13-b mostra que a sucessão de avalanches leva à formação de uma estrutura ramificada e filamentada em direção ao catodo chamada de *streamer*. Para um nível de tensão maior, o processo de avalanches extingue-se, pois os elétrons foto-gerados são emitidos em regiões fracas de campo formando nuvens de íons negativos lentos (figura 13-c). O campo aplicado continua polarizando a região de ionização fazendo com que a nuvem de íons negativos seja atraída pelo anodo e a de íons positivos afastada. A atividade transiente então cessa e as numerosas descargas tornam-se auto-sustentadas, estabelecendo uma pequena região de brilho corona junto à superfície deste eletrodo. Para tensões maiores, aumenta a luminosidade do brilho, tanto na área como na intensidade, a alta densidade da nuvem de íons negativos no ânodo não consegue manter sua estabilidade e intensos *streamers* iniciam-se e, ao atingirem o catodo, conduzem a completa ruptura do espaçamento conforme figura 13-d. (Kuffel; Zaengl, 1984; Abdel-Salam et al, 2000; Gallo, 1977).

A representação gráfica dos fenômenos físicos ocorrentes neste arranjo pode ser verificada na figura 14, onde curvas características de descarga corona e ruptura, para uma configuração ponta-plano positivo no ar atmosférico, são apresentadas.

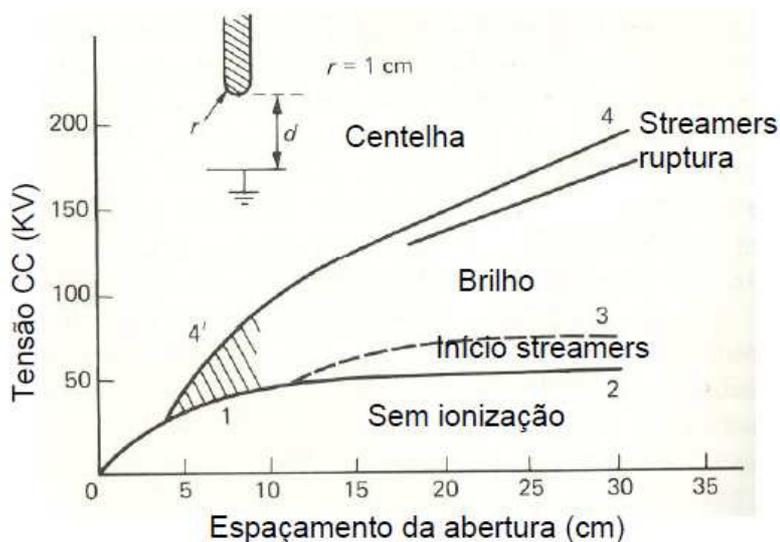


Figura 14. Curvas limiares dos vários modos de corona positivo e para ruptura de centelhas para um anodo tipo ponta e um catodo tipo placa (Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984)

Abaixo da curva 1-2, nenhum fenômeno de ionização apreciável é identificado, considerando espaçamento da abertura maior que 2 cm. Com o aumento do espaçamento, o campo torna-se mais distorcido e aparecem descargas transientes chamadas de *streamers* iniciais que correspondem a pulsos de correntes irregulares (região entre curvas 2-3). Entre as curvas 1-4, ainda ocorre uma região de instabilidade onde, para qualquer variação na tensão, a atividade corona conduz diretamente à ruptura. Aumentando a tensão (região entre curvas 3-4), os *streamers* tornam-se mais numerosos e frequentes. A atividade transiente pára e as descargas corona tomam a forma de brilho quase constante próximo à superfície do anodo. A intensidade luminosa e a área do brilho variam com a tensão e a correspondente corrente aqui se desenvolve de forma estável. Para a mesma faixa de espaçamento e aumentando mais a tensão, a nuvem de íons negativos no anodo perde sua estabilidade dando início a novos e vigorosos *streamers*, correspondendo a um pulso de corrente irregular de alta amplitude (região entre curvas *streamers* de ruptura - 4). Para uma tensão um pouco maior, a completa ruptura ocorre através do espaçamento da abertura do gás (região acima da curva 4) (Kuffel; Zaengl, 1984; Abdel-Salam et al, 2000).

A região entre as curvas 3-4 representa para a polaridade positiva, o local onde as descargas corona com característica estável estabilizam o espaçamento da abertura sem resultar em ruptura. Comparando as figuras 12 e 14, observa-se

que o nível de ruptura sob polaridade positiva ocorre em um valor bem menor do que sob polaridade negativa.

Pode-se concluir que a descarga corona positivo em atividade é difícil de controlar, ocorrendo frequentemente a ruptura. Desta forma, a produção de ozônio sob polaridade positiva apresenta uma menor eficiência comparada à polaridade negativa.

2.6.3.3 Corona CA

A divergência básica entre a geração de corona sob tensão CA e a tensão CC está na mudança periódica da direção do campo aplicado sob tensão CA e sua influência na carga espacial residual não levada em conta na descarga do semi-ciclo precedente. *Streamers* iniciais podem aparecer somente sobre uma pequena faixa da tensão inicial seguidos por corona de brilho (Abdel-Salam et.al, 2000).

Observando as figuras 12 e 14 sob condições normais de pressão e temperatura, verifica-se que a ruptura sob polaridade positiva ocorre em um nível de tensão muito menor do que sob polaridade negativa. Conseqüentemente, sob tensão CA, a ruptura ocorre obrigatoriamente durante o semi-ciclo positivo da onda de tensão (Kuffel; Zaengl, 1984). Desta forma, conforme indicado esquematicamente no figura 15, a geração de ozônio será mais intensa no semi-ciclo negativo do que no semi-ciclo positivo.

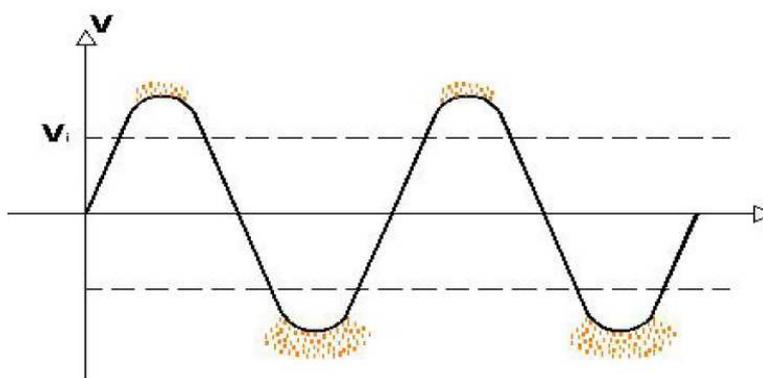


Figura 15. Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada

Comparando os fenômenos ocorrentes sob tensão CA e CC negativa e positiva, verifica-se que a descarga corona sob polaridade negativa é mais fácil de estabelecer que sob polaridade positiva. Além disso, para um mesmo espaçamento, opera sob tensão bem maior que o segundo podendo gerar coronas mais intensos. Pode-se concluir finalmente que a melhor configuração para geração de corona e conseqüente produção de ozônio é sob polaridade negativa, ficando a configuração sob tensão CA com valores intermediários entre estas polaridades.

2.6.3.4 Outros tipos de Descarga Corona

Outra possibilidade de se gerar descargas corona com maior eficiência é por meio do uso de conversores de alta frequência ou bobinas Tesla, com taxa de repetição inicial na faixa de kHz, ao invés das fontes de alimentação de frequência industrial (60 Hz) usadas tradicionalmente.

A figura 16 apresenta vários tipos de descarga corona.



Figura 16. Descargas corona
(Fonte: *Ozonium Systems*, 2011)

2.7 Sistemas de Geração de Ozônio Propostos na Literatura

De acordo com Armaroli (2007), muitas publicações encontradas na literatura especializada têm contribuído para o avanço nas pesquisas referente à geração de ozônio para uso industrial pelo processo das descargas corona. Com objetivo de otimizar a produção e obter a máxima concentração de ozônio a um baixo custo, as investigações têm se concentrado basicamente em alguns aspectos do processo, ou seja, na geometria da câmara de descarga, na configuração, disposição e tipo de metal dos eletrodos, em sistemas de fontes de alimentação a alta frequência e no princípio de geração de ozônio.

A seguir, são comentados alguns dos trabalhos mais recentes e de maior destaque, seguindo a linha de estudo referida.

Com relação à geometria da câmara de descarga e ao sistema de eletrodos, destaca-se inicialmente o trabalho de El-Mohandes et al (1985) que mediram a produção de ozônio por unidade de força (oppu) pertencente a um plano multiagulhas carregado com polaridade negativa. O instrumento consistia de um eletrodo de alta tensão introduzido no lado superior de uma câmara feita de vidro, dentro de um tubo de resina acrílica. Abaixo deste, no fundo da câmara, havia um elétrodo plano conectado a terra por meio de um micro amperímetro sensível de CC para medir o valor médio total da corrente corona e um resistor série para observar as várias modalidades de descargas corona. Os resultados das medidas para diferentes separações de agulhas e valores de tensão indicaram que a oppu aumenta com o aumento da separação das agulhas. Medidas mostraram também uma diminuição significativa no valor de oppu com a transição para o modo de descarga tipo sem pulso.

Chalmers et al (1994), desenvolveram uma pesquisa de gerador de ozônio onde estudaram os fatores que controlam a taxa de geração de ozônio em uma geometria fio-cilindro. O arranjo consistia de um espaçamento da descarga formado por um tubo de aço inoxidável com um fio esticado centralmente por meio de um arranjo mola-amarrada. Foram usados três diâmetros de fio. O fluxo de gás era axial usando oxigênio engarrafado e a vazão e a concentração de ozônio eram monitoradas por meio de um medidor de fluxo e um medidor de ozônio de absorção UV. O circuito para produção de pulsos de tensão de

polaridade negativa teve a frequência de pulsação limitada em 50 Hz sendo usados pulsos de 40 ns de duração numa faixa de tensão de 2,5 kV a 50 kV. Para medir a contribuição da energia na entrada do espaçamento da descarga em relação à produção de ozônio foi utilizada uma capacitância em série com a abertura. Os experimentos indicaram que o raio do eletrodo interno tem pequeno ou nenhum efeito sobre a taxa de geração de ozônio para uma dada tensão. Também verificaram que as taxas de produção nas quais a duração de descarga não é maior que 40 ns para cada ciclo, estão na mesma ordem dos geradores convencionais de tamanho similar operando em 50 Hz, a duração da descarga está em torno de 4 ms. O efeito de largura de pulso não foi estudado. Outro resultado verificado foi que as eficiências alcançadas em g/kWh indicaram que a tensão ótima era em torno de 30 a 40 kV. Finalmente, concluíram que há uma vantagem considerável em se usar pulsos de duração curta em lugar de senóides convencionais.

Park et al (2001), descreveram o desenvolvimento de um pequeno gerador de ozônio do tipo placa paralela usando descarga corona em plasma. Foram realizados testes de geração de ozônio variando parâmetros tais como a vazão e a composição do gás de alimentação, o espaçamento da descarga, a espessura dielétrica e a frequência do impulso. O sistema consistia de um compartimento de descarga, uma fonte de alta tensão, uma linha de entrada do gás de alimentação, uma linha de saída do gás ozônio e um sistema de refrigeração. Verificou-se que a composição do gás de alimentação afetou extremamente a taxa de geração de ozônio que foi aumentada na ordem do ar ambiente, ar seco e oxigênio puro. Aumentando a taxa de fluxo do gás, a taxa de geração de ozônio foi aumentada enquanto a concentração de ozônio foi diminuída.

Balakrishnan, Arunagiri e Rao (2002) estudaram o uso de ozônio em uma estação de tratamento de efluente típico de curtume como uma maneira estratégica para manter os níveis finais de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DQO (Demanda Química de Oxigênio) dentro de limites prescritos pelo método AWWA (*American Water Works Association*). Foi descrita a base das técnicas de ozonização aplicáveis em unidades de tratamento de efluente de curtume. A teoria de geração de ozônio e seu potencial de oxidação também foram mostrados. O sistema proposto consistia de um típico gerador de ozônio tubular, composto de eletrodos, dielétrico, espaço intereletrodo e sistema de

refrigeração. Um compressor a ar e um sistema de secagem de ar forneciam o ar de alimentação. O ozônio foi gerado pelo princípio da descarga elétrica silenciosa. Mediu-se o rendimento da produção de ozônio para várias vazões de ar e verificou-se a redução dos níveis de DQO e DBO, desintegração parcial de materiais orgânicos, redução de odor, cor e turbidez e minimização da contaminação biológica na disposição da água residual.

No trabalho de Shimosaki et al (2004), foi publicado o desenvolvimento de um ozonizador tipo descarga dupla (*trigger* e principal) para a geração eficiente de ozônio que altera a configuração do jogo de eletrodos de disparo no cátodo. A dependência da concentração de ozônio e do rendimento de ozônio no número de eletrodos de descarga *trigger* foi determinada. A máxima produção de ozônio foi obtida quando o número de eletrodos de descarga gatilho eram quatro. A produção de ozônio aumentou com a potência da descarga de gatilho até aproximadamente 0,04 W e então diminuiu com a potência de descarga maior do que 0,04 W.

Dentro do mesmo tema, Jenei e Kiss (2005) investigaram a capacidade de produção de ozônio pelo método da descarga sobreposta que combina o método de descarga de superfície com o método de descarga de volume. Este estudo incluiu dois arranjos diferentes de eletrodo. Um, usando o método do eletrodo auxiliar e o segundo pela confecção de uma placa dielétrica. Diferentes ajustes na fonte de alimentação também foram feitos. A investigação incluiu a medição do consumo de energia. Os resultados mostraram que mudanças na capacidade de produção do ozônio podem ocorrer sobre uma ampla faixa, por meio da variação da geometria e do ajuste da fonte de alimentação e que a capacidade de produção do ozônio pode ser mais efetiva que o simples método de descarga de superfície. Foi observado também que a capacidade de produção de ozônio dos novos tipos de arranjos de eletrodo foram, no mínimo, 40% maiores do que a descarga de superfície e pelo menos três vezes maior que a produção da descarga ou dos eletrodos auxiliares sozinhos. Com relação ao consumo de energia, o do novo sistema foi menor que 70% em comparação ao método padrão tipo descarga de superfície.

Muraica et al (2004), desenvolveram um sistema de reator de água ozonizada com descarga em barreira dielétrica coaxial. Uma tensão de 18 kV em frequência nominal 60 Hz foi aplicada entre o eletrodo interno de aço inoxidável,

aterrado, e eletrodo externo de metal. Neste arranjo, o ozônio foi gerado pela descarga filamentada sustentada no espaçamento de ar entre o eletrodo externo com barreira de vidro e uma camada de água fluindo como barreira do eletrodo interno. Assim, a produção de ozônio e sua dissolução na água ocorreram simultaneamente no mesmo volume de descarga. Os testes realizados em duas amostras diferentes de água indicaram que as concentrações de ozônio obtidas correspondem a valores tipicamente sugeridos para o tratamento de água potável e de esgoto.

No trabalho de Panaget, Goldman e Goldman (1996), realizou-se uma investigação a respeito dos processos físico-químicos induzidos no ar pelas descargas corona. Estes processos levam em consideração reações tanto na fase gasosa como nas superfícies do eletrodo. Assim, concluiu-se que a produção de ozônio foi sensível a diferentes componentes da corrente de descarga, à umidade relativa do gás e à natureza dos eletrodos. A célula experimental consistia de um arranjo eletrodo fio-cilindro. O fio tinha diâmetro de 125 μm e comprimento de 8 cm e estava instalado axialmente no centro do cilindro. O cilindro era um disco de 8 cm de diâmetro feito do mesmo material do fio (cobre, alumínio ou aço inoxidável). Uma alta tensão foi aplicada no eletrodo fio que estava interligada a esta por meio de uma resistência de 25 M Ω . As experiências foram realizadas com ar purificado, isento de contaminantes específicos, à temperatura e umidade controladas, com diferentes materiais de eletrodo (cobre, alumínio e aço inoxidável) e aplicadas tensões positiva, negativa e alternada (50 Hz). O ozônio foi analisado pelo espectroscópio de absorção UV. Os resultados experimentais indicaram que a concentração de ozônio aumentou proporcionalmente à corrente de descarga média. A produção de ozônio foi maior sob tensões negativas do que sob as positivas e com valores intermediários para tensões alternadas. Já as curvas de produção de ozônio são independentes do comprimento do espaçamento da descarga. Para um aumento na umidade do gás produziu-se uma diminuição na mobilidade dos íons e, como consequência, um decréscimo da corrente de descarga foi observada. Finalmente, em condições normais de pressão e temperatura e sem umidade, o material cobre pareceu ser o melhor para a produção de ozônio.

Na mesma linha de pesquisa, Pontiga, Soria e Castellanos (2004), abordaram uma investigação experimental de geração de ozônio por meio da

descarga corona negativa numa geometria coaxial fio-cilindro a fim de esclarecer como a composição do eletrodo anodo influenciava a concentração de ozônio. Assim, três diferentes materiais foram usados no anodo: aço inoxidável, alumínio e aço carbono. O arranjo experimental consistiu de um fio de tungstênio de 0,1 mm de diâmetro, situado no interior de um cilindro metálico de 5 cm de comprimento, com raio interno de 8,5 mm. O fio de tungstênio foi submetido a uma alta tensão CC negativa e a corrente corona foi medida usando um multímetro digital. A cela de descarga foi fechada com duas tampas isolantes equipadas com aberturas paralelas e preenchida com oxigênio a pressão atmosférica. A concentração de ozônio saturado foi então medida por meio de um espectrofotômetro UV. Os resultados mostraram que a concentração de ozônio aumentava rapidamente a proporção que a intensidade da corrente aumentava. A máxima concentração obtida foi para a configuração com anodo em aço carbono e a mínima, para com alumínio. Entretanto, para um aumento adicional na intensidade da corrente ou da tensão aplicada, a concentração de ozônio decrescia. Os autores concluíram então que, devido ao efeito Joule, a temperatura do gás ficava bem acima da temperatura ambiente quando uma descarga corona estava em desenvolvimento, especialmente em altas tensões. Este efeito era intensificado pelo isolamento térmico da célula de descarga. Então, a alta temperatura neste local aumentava a decomposição de ozônio, resultando no decréscimo da sua concentração.

Com referência a fontes de alimentação, Alonso et al (2002, 2004), realizaram um estudo utilizando conversores de alta frequência para alimentar um ozonizador, ao invés das fontes de alimentação de baixa frequência usadas tradicionalmente. Basicamente, estes conversores devem fornecer baixas perdas de potência por serem pequenos, leves e terem a possibilidade de controlar a quantidade de ozônio gerado. Foram evidenciados, primeiramente, os testes em laboratório de um reator de ozônio de alta frequência e um novo modelo matemático para este tipo de reator foi proposto, a seguir, um estágio simples de fonte de alimentação foi apresentado e analisado. Neste primeiro trabalho, o conversor proposto foi usado para uma saída de potência muito baixa em torno de 1 Watt. As simulações de laboratório incluíram efeitos parasíticos e os resultados experimentais encontrados sustentaram a análise apresentada. Portanto, os

autores ficaram confiantes que a topologia proposta possa ser utilizada em ozonizadores de maior potência.

Com relação a sistemas de geração de ozônio, destaca-se Stanley (2004) que publicou um trabalho a respeito da geração de ozônio pelo processo eletrolítico. Foi apresentada, primeiramente, uma discussão a respeito dos benefícios deste tipo de geração de ozônio em relação a outras tecnologias de desinfecção. A seguir, fez uma comparação da produção de ozônio pelo método das descargas corona silenciosa com o método eletrolítico, expondo as vantagens do método proposto em sistemas de água limpa, porque somente baixas concentrações de ozônio são necessárias para desinfetar o sistema e não há nenhum subproduto ou resíduo desagradável após o tratamento. O sistema eletrolítico é um método fundamentalmente diferente de dissociação da água devido ao fato de se usar uma membrana de polímero sólido como eletrólito ao invés do fluido. Esta característica, em conjunto com a reação anódina intermediária apropriadamente controlada, torna-o particularmente adaptado para desinfecção de sistemas de água limpa.

Malik, Ghaffar e Malik (2001) descreveram um trabalho na área de tratamento de água e esgotos em que há uma crescente necessidade de tornar os processos de ozonização mais baratos, efetivos e competitivos em relação aos métodos convencionais (cloração). Para tanto, além de estudarem algumas técnicas de descargas elétricas diretas na água para geração de ozônio, estão estudando também as propriedades físicas e químicas de materiais catalisadores na geração de ozônio. Os resultados mostraram que, a técnica de descarga corona pulsada com altas tensões durante a ionização, conduziram a uma melhor dispersão do ozônio na água e a conseqüente conversão deste em radicais livres. Esta e outras diferentes espécies ativas quimicamente, geradas pelas descargas elétricas e que possuem potencial de oxidação próximo ou maior que o ozônio, atacaram diretamente os poluentes aquosos. Desta forma, a aplicação de catalisadores nos reatores de descarga elétrica, em adição ao ozônio, gerados por descargas elétricas diretas, podem resultar na redução dos custos dos processos de ionização.

2.8 Ozônio em Contato com Sistemas Aquosos

Como o gás ozônio é aproximadamente 13 vezes mais solúvel em água que o oxigênio, a aplicação bem sucedida do ozônio na água é muito importante no processo. Uma interface gás/líquido está envolvida e existem várias técnicas para este fim (Rice et al, 1986).

Por ser um produto com uma vida média relativamente curta, com rápida degradação para formação de moléculas de oxigênio, não é possível armazená-lo para posterior utilização ou mesmo proceder-se a metodologia de aplicações lentas. Dessa forma, este gás deve ser dissolvido na forma de soluto em uma solução gás-líquido. Em outras palavras, o sucesso da esterilização de um meio líquido por ozônio é fortemente dependente da eficiência do método utilizado para a diluição de um gás em líquido.

Existe uma grande variedade de câmaras utilizadas para introduzir o ozônio no meio líquido, tais como câmara difusora de ar contra corrente, câmara de mistura com difusores, misturadores estáticos em linha e outros. As câmaras devem ser projetadas para realizarem uma alta eficiência de transferência do ozônio (Hassemer, 2000).

Escoamentos bifásicos entre líquidos e gases têm como objetivo a transferência de massa entre o gás e o líquido, sendo largamente difundidos na indústria. Nas indústrias alimentícia, farmacêutica e química é comum a necessidade de remoção de contaminantes solúveis, tais como o oxigênio e a umidade. Estes contaminantes, na maioria das situações, podem ser removidos por meio de borbulhamento de gás insolúvel na mistura contaminada, de forma a arrastar o contaminante. Este tipo de processo é denominado de “*Stripping*” ou dessorção. Já no caso da aeração, pretende-se efetuar a transferência de oxigênio para o líquido.

Um parâmetro muito importante nestes processos é a eficiência com que a transferência de massa se efetua. Uma forma sugerida é por injeção de ozônio na forma de pequenas bolhas, de maneira a aumentar a área da superfície de interface entre gás e líquido, quanto menores forem as bolhas produzidas, maior será a eficácia da transferência.

Na maioria dos casos, obtém-se escoamento borbulhante a partir de meios porosos. Uma alternativa aos meios tradicionais de geração deste tipo de

escoamento é a utilização de um Venturi (figura 17), cuja atuação se dá pela sucção do gás na câmara de alívio de pressão do jato de água (tubo com constricção).

A grande vantagem deste equipamento é que sua geometria faz com que a velocidade de escoamento seja modificada a cada instante. Esta variação de velocidades provoca ondas de choque que fragmentam as bolhas de gás em bolhas de diâmetro menor, aumentando assim a área interfacial da mistura.

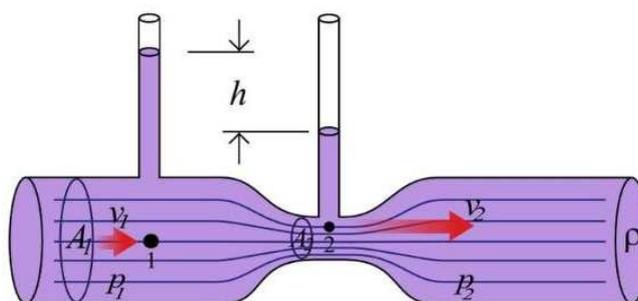


Figura 17. Esquema básico de um venturi
(Fonte: *Spartan environmental technologies air and water treatment*, 2011)

O fluxo de água é produzido por uma bomba de água, cujas dimensões são adequadas à geometria do venturi. Faz-se então a análise da formação dessas micro-bolhas com o uso de venturi em diferentes condições experimentais, tendo-se como base medições de ozônio diluído na água feitas com equipamento adequado.

Durante a transferência do ozônio para o meio líquido, a uma taxa finita, o andamento é afetado por uma série de parâmetros, por exemplo, a viscosidade da água, a temperatura, a quantidade de sólidos, assim como a concentração de ozônio, pois quanto maior a concentração de ozônio, maior será a taxa de transferência do ozônio para a água.

A transferência completa de todo o ozônio aplicado ao tanque de contato raramente ocorre, na maioria dos casos, a eficiência de transferência chega a um máximo de 97%. Isto significa que os gases acima do tanque de contato contêm excesso de ozônio, que não foi transferido para a solução aquosa.

Geralmente o excesso de ozônio nos gases de escape é destruído antes de serem descarregados na atmosfera, por processos térmicos ou catalíticos. Do ponto de vista do controle de processo e sua respectiva metodologia analítica, é

importante que a concentração de ozônio nos gases de escape seja conhecida com precisão, pelos seguintes motivos:

- O dimensionamento adequado do sistema de destruição de ozônio.
- Determinação da quantidade de ozônio utilizada, em relação à quantidade de ozônio aplicada.
- Garantir a utilização eficaz de ozônio (evitando excesso na geração e desperdício de ozônio).
- A reutilização dos gases de escape em múltiplos estágios de aplicações de ozônio.
- Controle automático da quantidade de ozônio aplicada.

2.9 Métodos de Determinação de Ozônio no Ar e na Água

Métodos iodométricos de medição de ozônio no ar e na água, são baseados em mecanismos de reações químicas conhecidas e fáceis de implementar. Esses procedimentos também são usados como métodos de referência e de calibração de instrumentos utilizados para medir concentrações de ozônio na água (Rice et al, 1986).

2.9.1 Medição de Ozônio no Ar

Nenhum método para medição de ozônio no ar está padronizado. Desta forma, o ozônio pode ser medido no ar por iodometria utilizando dois agentes redutores para medir o iodo liberado: arsenito de sódio ou tiosulfato de sódio.

Um estudo entre estes dois métodos mostrou que o método de tiosulfato de sódio (T) apresenta resultados melhores que os do método de arsenito de sódio (A). A relação entre a medição de ozônio por estes dois métodos ($r = T/A$) mostra que a proporção aumenta com a concentração de ozônio. A diferença pode atingir 30% para uma concentração de 85 mg/L.

A diferença entre as medições podem ser causadas pela presença de gases brancos abundantes na saída da mistura de iodo-arsenito, estes gases

brancos também existem no método KI 2%. Estes gases, quando removidos por lâ de vidro, se comportam como um iodato após acidificação e adição de iodeto de potássio.

Medições de iodo liberado mostram que, no caso do método do arsenito, de 3 a 5 vezes mais gases brancos são produzidos do que no método KI 2%. Em ambos os métodos, mais especificamente no método do arsenito, o ozônio é medido no ar ou oxigênio por sua ausência.

2.9.2 Medição de Ozônio na Água

Embora vários métodos de medição de ozônio na água estejam disponíveis, o método iodométrico continua sendo mais comumente utilizado. Um reagente muito sensível para o iodo é disponível sob a forma de siringaldazina, que foi introduzido inicialmente como reagente para cloro livre. O ozônio liberado por este método pode ser medido por siringaldazina, que assume uma tonalidade rosa/violeta com o máximo de absorção em 585 nm. Como resultado, o ozônio pode ser determinado espectrofotometricamente em concentrações entre 0 e 1,4 mg/L.

Uma comparação entre o método iodométrico de redução do iodo liberado com arsenito de sódio N/24 e o método de medição de ozônio por siringaldazina mostra que este último dá resultados superiores aos obtidos pelo método do arsenito.

2.9.3 Métodos Disponíveis

A seguir, serão detalhados os métodos disponíveis para a análise de ozônio dissolvido, segundo Rice et al, (1986). Um resumo dessas análises são apresentados com a finalidade de comparar os métodos. Na prática, os dois métodos utilizados com mais frequência são considerados padrões, esses dois métodos são o processo iodométrico e ultravioleta direta (UV) método de absorbância.

Oxidação Iodométrica

Princípio: Oxidação de I^- para I_2 ; detecção de I_3^- por titulação eletrométrica ou métodos fotométricos.

Vantagens e limitações: Alta sensibilidade de detecção de aproximadamente 2 $\mu\text{g/L}$; interferência de mais oxidantes; estequiometria de reação questionada; prováveis perdas de ozônio devido a coleta e tratamento.

Espectrofotometria Ultravioleta

Princípio: Molécula de ozônio absorve a luz UV de 254 nm, coeficiente de extinção molar de aproximadamente 2900 L/mole-cm.

Vantagens e limitações: Alta sensibilidade de detecção de 20 $\mu\text{g/L}$ com comprimento de 50 cm de células; pode ser usado como analisador de processos contínuos; potenciais interferências incluindo compostos orgânicos e inorgânicos que absorvem numa faixa de 240 a 300 nm, sólidos suspensos e cor.

Leuco Cristal Violeta

Princípio: Oxidação de leuco cristal violeta para cristal violeta; medidas de absorbância de cristal violeta a 592 nm; absorvidade molar de 10 L/mole-cm.

Vantagens e limitações: Sensibilidade de detecção aproximada 1 $\mu\text{g/L}$; interferência de alguns oxidantes, especialmente o dióxido de manganês; o maior problema é o kit de teste de coloração devido ao uso do corante.

Dietil-p-fenilenodiamina (DPD)

Princípio: Oxidação do DPD, detecção por titulação ou métodos fotométricos.

Vantagens e limitações: Sensibilidade na detecção de níveis abaixo de mg/L, disponível na forma de kit para usos; sofre a interferência de alguns oxidantes, especialmente halogênios e manganês; o maior problema é a estabilidade dos produtos e reagentes.

FACTS (Siringaldazina)

Princípio: Oxidação do iodeto para iodo; iodo oxida siringaldazina; detecção fotométrica em 530 nm.

Vantagens e limitações: Sensibilidade moderada; requer adição de dois reagentes, sujeita a interferências de outros agentes oxidantes.

Siringaldazina (glicina)

Princípio: Glicina adicionada ao retirar ozônio; determinação baseada na oxidação do I⁻ e siringaldazina; detecção por titulação.

Vantagens e limitações: Sensibilidade em patamares menores que mg/L; requer determinações distintas de oxidante total (ozônio-oxidante).

Azul-Índigo

Princípio: Branqueamento com ozônio por corante índigo medido espectrofotometricamente em 600 nm.

Vantagens e limitações: Boa sensibilidade em patamares menores que mg/L; peróxido não interfere; manganês e cloro não interferem.

Ácido Violeta Cromo k

Princípio: Branqueamento por corante ACVK medido espectrofotometricamente em 550 nm.

Vantagens e limitações: Sensibilidade de detecção moderada.

Eletrodos Amperométricos

Princípio: Redução de O₃ para O₂ diretamente na solução; qualquer solução de eletrólise para criar camada de difusão; corrente diretamente proporcional à concentração.

Vantagens e limitações: Boa sensibilidade, aplicável como monitoramento contínuo; interferências de agentes oxidantes no eletrodo.

Amperométrica de Estado Estável

Princípio: Difusão por meio de filmes de O_3 a serem reduzidos para O_2 em uma película fina do eletrólito entre o eletrodo e a membrana; corrente controlada pela taxa de difusão da membrana é diretamente proporcional à concentração.

Vantagens e limitações: Boa seletividade para o ozônio molecular na presença de outros oxidantes; Limites com efeitos de membrana de agentes incrustantes, mas pode ser ultrapassado; boa sensibilidade; aplicável para o monitoramento contínuo; forte dependência da temperatura.

Amperométrico Pulsante

Princípio: Difusão por meio da membrana, mas sem interferências nos limites do controle de corrente; O_3 em filme do eletrólito reduzido para O_2 ; corrente diretamente proporcional à concentração.

Vantagens e limitações: Mesmas vantagens do anterior, incrustação da membrana e dependência com a temperatura não tão significativa quanto com eletrodos de estado estacionário.

2.9.4 Sensores Eletrônicos

Com o avanço tecnológico, vários sensores de ozônio eletrônicos foram desenvolvidos, mas ainda com um custo muito alto, o que muitas vezes torna inviável a aquisição para fins de pesquisa, fazendo com que o uso da técnica de titulação iodométrica seja adotada como medida padrão.

Como exemplo de sensores eletrônicos tem-se:

- Analisador de gás ozônio do fabricante *ANSEROS*, conforme figura 18;



Figura 18. Analisador de gás ozônio *ANSEROS – Monitor MP*
(Fonte: *Anseros*, 2012)

- Transmissores M300 *THORNTON (METTLER TOLEDO)*, figura 19, que analisam condutividade, resistividade, PH, ORP, oxigênio dissolvido, ozônio dissolvido, fluxo e fluxo total. Utilizado no tratamento de água pura e ultrapura para aplicações em semicondutores e águas farmacêuticas entre outros.



Figura 19. Transmissor M300 *THORNTON*
(Fonte: *Mettler Toledo International INC*, 2011)

A medição de ozônio dissolvido dos sensores *Mettler Toledo/Thornton* baseia-se no modelo de sensor testado e aprovado, com respostas rápidas e precisas a concentrações de ozônio. Sua excelente sensibilidade assegura a detecção do ozônio zero após sua destruição pela radiação UV.

O sensor polarográfico utiliza uma membrana permeável a gás, pela qual o ozônio passa para produzir uma reação eletroquímica e fluxo de corrente diretamente proporcional à concentração. A membrana é reforçada por silicone,

garantindo sua resistência. Atrás da membrana está o cátodo de platina onde ocorre a reação do ozônio, resultando na produção do sinal de medição. A reação eletroquímica é concluída no ânodo de prata. A total compensação de temperatura responde pelos efeitos tanto da permeabilidade da membrana quanto da solubilidade do ozônio na água.

O projeto do sensor inclui um cartucho de membrana que permite extrema facilidade de substituição do eletrólito e da membrana, sempre que necessário. O sensor utiliza um conector VP e vedação por O-ring na câmara de fluxo de fácil instalação e remoção.

Aplicações:

- **A sanitização dos sistemas de água farmacêutica** pode ser completamente garantida por meio do controle da ozonização com base em uma medição de ozônio após o tanque de armazenamento. Para garantir a remoção de todo o ozônio após sua destruição com UV, uma segunda medição do ozônio é capaz de confirmar o nível zero. Quando todo o sistema de distribuição for ozonizado com as luzes UV desativadas, uma terceira medição no retorno da tubulação de distribuição poderá mostrar quando se alcançou um nível adequado de ozônio em todo o ciclo.

- **Nos sistemas de água engarrafada** monitoram-se os níveis de ozonização para garantir a apropriada sanitização da água que, por sua vez, sanitiza as garrafas e vedações. A medição contínua e o controle de níveis adequados de ozônio constituem uma prática fundamental de qualidade, que assegura a consistência de sabor e sua longa vida de prateleira.

- **A indústria de bebida** frequentemente utiliza água ozonizada no lugar de substâncias químicas, para operações "*clean-in-place*" (CIP) quando ocorre a mudança de sabores. Em vez de utilizar ácidos, cáusticos ou cloro, o ozônio é capaz de assegurar a limpeza e desinfecção sem o risco de resíduos ou subprodutos inaceitáveis.

Além das aplicações acima citadas, o sensor também pode ser utilizado no monitoramento da sanitização por ozônio em água ultra pura na indústria de semicondutores.

Recursos:

- Respostas rápidas e precisas.
- Detecção positiva de nível zero.
- Baixa manutenção com membrana modular espúria.
- Instalação possível com o transmissor 770MAX ou 2000, figuras 20 e 21.



Figura 20. Transmissor multiparâmetro 770MAX e sensor
(Fonte: *Mettler Toledo International INC, 2011*)



Figura 21. Transmissor 2000 com dois canais e sensor
(Fonte: *Mettler Toledo International INC, 2011*)

Está disponível ainda pela *METTLER TOLEDO – THORNTON* um simulador de sensor de ozônio que simula ozônio (figura 22) e sinais de temperatura, sem a necessidade da ozonização e a polarização do sensor, permitindo a verificação de medição de um transmissor de ozônio, fiação e calibração antes de iniciar o sistema de tratamento.



Figura 22. Simulador de ozônio e sinais de temperatura THORNTON
(Fonte: *Mettler Toledo International INC, 2011*)

- Transmissores 2 fios para PH, ORP, condutividade, oxigênio, ozônio e cloro da Emerson Process Management. A família de transmissores Modelo 5081 (figura 23) pode ser usada para medir pH, ORP, condutividade (usando tanto sensores de contato quanto toroidais), resistividade, oxigênio (nível ppm e ppb), cloro livre, cloro total e ozônio em uma grande variedade de líquidos de processo. O 5081 é compatível com a maioria dos sensores “*Rosemount Analytical*”.



Figura 23. Família de transmissores 2 fios - Modelo 5081
(Fonte: *Emerson Process Management, 2012*)

- Existem ainda outros sensores de fabricantes internacionais, assim como os apresentados nas figuras de 24 e 25 .



Figura 24. Monitor portátil de ozônio da *O3 Technologies Co*
(Fonte: *O3 Technologies Co, 2011*)



Figura 25. Sensor/analizador de ozônio da *O3 Technologies Co*
(Fonte: *O3 Technologies Co, 2011*)

2.10 Aplicações de Ozônio VS Concentração

As tabelas 5 e 6 apresentam alguns dados básicos para tratamentos de água com relação à concentração de ozônio necessária para cada caso e aplicações, respectivamente.

Tabela 5. Dados da aplicação de ozônio para tratamento de água

Dados da aplicação de ozônio para tratamento de água			
Água Tratada	Concentração de ozônio (mg/L)	Tempo (min)	Eficácia (%)
Aquário; Lagoas	0,10 ~ 0,05	Constante	> 90
Água do banho	0,1 ~ 0,5	Constante	> 90
Água da Piscina	0,5 ~1,0	5	> 90
Remoção de odores	0,5 ~1,0	1	> 80
Esterilização de água potável	0,5 ~1,0	5	> 99,9
Esterilização de água limpa	1,0 ~ 2,0	5	> 90
Esterilização de água suja	2,0 ~ 3,0	5	> 90
Água para enxaguar	2,0 ~ 3,0	5	> 80
Remoção de compostos orgânicos	1,0 ~ 3,0	5	> 30

(Fonte: O3 Technologies Co, 2011)

Tabela 6. Aplicações de gás ozônio

Aplicações de gás ozônio			
Campo	Objetivo	Finalidade	ozônio (PPM)
Casa	Sala de estar, cozinha, vestiário, banheiro	Prevenir insetos (barata, carrapato, mosca) prevenção de doenças infecciosas de animais de estimação, remoção de odores, morte de bactérias	0,001 ~ 0,003
Construção	Lixo, lavabo	Remoção de odores	0,02 ~0,5
Hospital	Sala de consulta, sala de espera, sala cirurgia, passagem	Prevenir infecções secundárias, remover odores	0,01 ~ 1,0
Indústria pecuária	Suinocultura, criação de aves	Prevenir infecções secundárias, remover odores	0,01 ~ 0,03
Indústria Alimentícia	Área de cozinhar, área de embalagens, vestiário, depósito de lixo bruto, banheiro, limpeza vegetal	Limpeza de área de trabalho (eliminar odores e matar bactérias), cozinha, máquinas e operadores	0,01 ~ 1,0
Mercado de logística	Congelamento comercial, armazém, caminhão, navios	Prolongamento de frutas frescas, legumes, carnes, remover odores	0,01 ~ 0,5

(Fonte: O3 Technologies Co, 2011)

A tabela 7 apresenta uma relação de concentração de ozônio necessária para inativação de alguns vírus e bactérias.

Tabela 7. Patógeno versus dosagem

Patógeno	Dosagem
Aspergillus niger	Destruído por 1,5 a 2 mg/L
Bactéria Bacillus	Destruído por 0,2 mg/L em 30 seg
Bacillus Anthracis	Ozônio suscetíveis
Bacillus Cereus	99% de destruição após 5 min a 0,12 mg/L em água
B. Cereus (esporos)	99% de destruição após 5 min a 2,3 mg/L em água
Bacillus subtilis	Redução de 90% a 0,10 ppm por 33 min
Bacteriófago f2	99,99% de destruição a 0,41 mg/L por 10 seg em água
Botrytis cinerea	3,8 mg/L em 2 minutos
Cândida bactérias	Ozônio suscetíveis
Clavibacter michiganense	99,99% de destruição a 1,1 mg/L em 5 min
Cladosporium	Redução de 90% a 0,10 ppm em 12,1 min
Bactéria clostridium	Ozônio suscetíveis
Esporos do clostridium botulinum	0,4 a 0,5 mg/L valor limite
Vírus coxsackie A9	95% de destruição a 0,035 mg/L em 10 seg em água
Vírus coxsackie B5	99,99% de destruição a 0,4 mg/L em 2,5 min no lodo de efluente
Difteria pathogen	Destruído a 1,5 a 2 mg/L
Eberth bacillus	Destruído a 1,5 a 2 mg/L
Echo vírus 29	99,999% de destruição a 1 mg/L em 1 min
Vírus entéricos	95% de destruição a 4,1 mg/L em 29 min no esgoto bruto
Bactérias escherichia coli	Destruído a 0,2 mg/L em 30 seg no ar
E-coli (em água limpa)	Destruição de 99,99% a 0,25 mg/L em 1,6 min
E-coli (em águas residuais)	Destruição de 99,99% a 2,2 mg/L em 19 min
Encefalomiocardite Vírus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Endamoebic cistos bactérias	Ozônio suscetíveis
Vírus enterovirus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici	1,1 mg/L por 10 min
Fusarium oxysporum f. sp. melonogea	99,99% de destruição a 1,1 mg/L em 20 min
GDVII Vírus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Vírus da hepatite A	99,5% de destruição a 0,25 mg/L em 2 seg em um tampão de fosfato
Herpes Vírus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L

Continuação – Tabela 7	
Vírus Influenza	0,4 a 0,5 mg/L valor limite
Bacillus klebs-löffler	Destruído a 1,5 a 2,0 mg/L
Legionella pneumophila	99,99% de destruição a 0,32 mg/L em 20 min em água destilada
Luminescent basidiomycetes	Destruído em 10 min a 100 ppm
Mucor piriforme	3,8 mg/L em 2 min
Mycobacterium avium	99,9% de destruição com um valor de 0,17 CT em água
Foruitum Mycobacterium	90% de destruição a 0,25 mg/L em 1,6 min em água
Penicillium bactérias	Ozônio suscetíveis
Phytophthora parasítica	3,8 mg/L em 2 min
Vírus da Poliomielite	99,99% de destruição a 0,3 a 0,4 mg/L em 3 a 4 min
Poliovírus tipo 1	99,5% de destruição a 0,25 mg/L em 1,6 min em água
Bactérias proteus	Muito suscetível
Bactérias pseudomonas	Muito suscetível
Vírus rhabdovirus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Salmonella	Muito suscetível
Salmonella typhimurium	99,99% de destruição a 0,25 mg/L em 1,67 min em água
Schistosoma bactérias	Muito suscetível
Staph epidermidis	Redução de 90% a 0,1 ppm em 1,7 min
Estafilococos	Destruído a 1,5 a 2,0 mg/L
Vírus da estomatite	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Bactéria streptococcus	Destruído a 0,2 mg/L em 30 seg
Verticillium dahliae	99,99% de destruição a 1,1 mg/L em 20 min
Vesicular vírus	Destruída para o nível zero em menos de 30 seg a 0,1 a 0,8 mg/L
Cólera bactéria virbrio	Muito suscetível
Vicia faba progênie	O ozônio provoca aberrações cromossômicas e seus efeitos é o dobro daquele observado pela ação dos raios-X

(Fonte: O3 Technologies Co, 2011)

2.11 Unidades de Medidas para o Gás Ozônio

Atualmente diferentes unidades de medidas para o gás ozônio são encontradas em trabalhos científicos, tais como, ppm, ppb, g/m³, mg/l entre outras. A seguir é apresentada uma breve descrição para as mais comuns.

ppm (partes por milhão) – é uma medida de concentração. Isto indica quantas partes do gás em questão, existem em cada 1 milhão de partes de gás total. Por exemplo, se existe um estado de ozônio ppm, isso significa que para

cada 1 milhão de partes de gás, um deles é o ozônio. Pode-se estar medindo as “partes” em volume ou peso. Assim, ppmv indica partes por milhão em volume. Esta é a medição de ozônio mais comum. A unidade ppm é usada para medir ozônio no ar e ozônio dissolvido em água.

ppb (partes por bilhão) – esta indica a mesma coisa que ppm, apenas a alteração milhões para um bilhão. Isso move um ponto decimal, por exemplo 0,1 ppm = 100 ppb.

mg/l (miligramas de ozônio por litro) – é uma medida de concentração. Isto indica quantos miligramas de ozônio, há em um litro de volume total. A unidade mg/l pode ser usada para indicar a concentração de ozônio no gás ou líquido.

g/m³ (gramas de ozônio por metro cúbico) – é uma medida de concentração. Isto indica quantos gramas de ozônio existem em um metro cúbico de volume total. Isto pode indicar o volume de um gás ou líquido. A unidade g/m³ é mais comumente usada para medir a concentração de ozônio em uma corrente de gás.

% em peso (porcentagem em peso) – é uma medida de concentração. Isto indica a porcentagem (%) de ozônio dentro de um fluxo de gás fornecido. Este é um método muito comum para ilustrar a concentração de ozônio a partir de um gerador de ozônio. Esta medida é mais complicada do que g/m³, já que o peso muda se o gás em que o ozônio é misturado for ar ou oxigênio.

g/h (g/hr) (gramas de ozônio por hora) – é uma medida da produção de ozônio. Este é o método mais comum de medir a saída de um gerador de ozônio. Pode-se medir a concentração de ozônio em g/m³, em seguida, quando conhecida a taxa de fluxo medida em LPM (litros por minuto), por exemplo, pode-se determinar quantos gramas de ozônio são produzidos em uma hora de tempo. Ainda pode-se utilizar suas variações, tais como, kg/dia, kg/h, mg/h, mg/min e g/min.

De acordo com *O3 Technologies Co* (2011):

Propriedades física a condições padrão p = 1.013,25 mbar, T = 273,3K:

- Densidade do ozônio - 2,14 kg/m³
- Densidade do oxigênio - 1,43 kg/m³
- Densidade do ar - 1,29 kg/m³
- Densidade da água - 1000 kg/m³

Fatores de conversão úteis para água:

- 1000 litros = 1 m³ = 264 galões EUA
- 1 galão = 3,785 litros = 3785 ml
- 1 m³ = 35,3 pés³ = 264 galões EUA

Concentração de ozônio em água:

- 1 mg/l = 1 ppm de O₃ = 1 g de água por peso O₃/m³

Concentração de ozônio no ar por volume:

- 1 g O₃/m³ = 467 ppm O₃
- 1 ppm O₃ = 2,14 mg O₃/m³
- 100 pphm (partes por cem milhões) = 1 ppm (partes por milhão)

Concentração de ozônio no ar por peso:

- 100 g O₃/m³ = 7,8% O₃ (aproximado)
- 1% O₃ = 12,8 g O₃/m³ (aproximado)

Concentração de ozônio em oxigênio por peso:

- 100 g O₃/m³ = 6,99% O₃ (aproximado)
- 1% O₃ = 14,3 g O₃/m³ (aproximado)

Por exemplo, para converter uma concentração de ozônio de g/m³ para PPM por volume tem-se: PPM O₃ = C x 467, isto significa que 2,14 g/m³ em condições normais = 1000 ppm.

Se a concentração em g/m³ for conhecida assim como a vazão em LPM, pode-se calcular a produção de ozônio em g/h, da seguinte forma:

$$\text{Concentração (g/m}^3\text{)} \times \text{Vazão (LPM)} \times 0,001 \text{ (m}^3\text{/l)} = \text{Saída O}_3 \text{ (g/min)} \quad (2.6)$$

Então se um gerador de ozônio produz uma concentração de ozônio de 28,7 g/m³ a uma vazão de 2,9 LPM, a conversão fica:

$$28,7 \text{ g/m}^3 \times 2,9 \text{ LPM} \times (1 \text{ m}^3\text{/1000 litros)} = 0,083 \text{ g/min}$$

$$0,083 \text{ g/min} \times 60 \text{ min} = 4,9 \text{ g/h}$$

2.12 Aplicações do Ozônio

De acordo com Okte Engenharia e Consultoria LTDA, Brasil Ozônio Soluções Tecnoecológicas com Ozônio e site Ozonizando, a tecnologia de ozônio pode ser utilizada para uma infinidade de aplicações, tais como:

- Oxidação.
- Desinfecção.
- Detoxificação.
- Descoloração.
- Desodorização.
- Preservação de pescados.
- Preservação de alimentos.
- Melhoramento da biodegradabilidade.
- Degradação de substâncias orgânicas.
- Redução/eliminação de biofilme.
- Limpeza de tubulações e redes.
- Medicina.
- Odontologia.
- Tratamentos de águas.
- Tratamentos de efluentes domésticos e industriais.
- Piscicultura.

Marco regulatório: Em Junho de 2001 o órgão norte-americano FDA (*Food and Drug Administration*) concedeu o título GRAS (*Generally Recognized As Safe*, ou comumente reconhecimento como seguro) ao ozônio, para uso em aplicações com contato com alimentos (*O3R The Ozone Way*, 2011).

A seguir serão apresentadas algumas aplicações detalhadas do uso do ozônio, de acordo com o a fonte ozonizando.

- Combate de bactérias super-resistentes:

O ozônio é usado para matar bactérias desde o início do século passado. No ano de 2010 descobriu-se que o ozônio pode destruir os micro-organismos

que nem os antibióticos conseguem combater (bactérias super-resistentes). Os cientistas encontraram uma forma de combater a superbactéria KPC, que provocou a morte de 18 pessoas em Brasília em 2010.

Dez bactérias foram testadas. As amostras divididas em três grupos: o primeiro foi exposto ao ozônio por cinco minutos; o segundo, a oxigênio; o terceiro grupo não teve nenhum tratamento. No dia seguinte, as bactérias tinham se multiplicado nos dois últimos vidros. No que foi tratado com ozônio, nenhum sinal.

O último teste foi feito com a KPC, que ganhou o apelido de superbactéria por ter se mostrado imune aos antibióticos mais potentes. A amostra que recebeu o ozônio também ficou limpa.

As moléculas do ozônio corroem a parede externa das bactérias e elas são rapidamente destruídas. O gás pode ser usado na pele ou injetado no corpo do paciente. A próxima etapa do estudo vai investigar se a vaporização de ozônio no ambiente, no centro cirúrgico ou em uma UTI, por exemplo, também elimina as bactérias.

O equipamento possui baixo custo se comparado com outros equipamentos hospitalares e usa ar ambiente como matéria-prima. Então não tem gasto. Pode modificar completamente o cenário do controle das bactérias hospitalares de uma maneira simples, de uma maneira barata e acessível em qualquer hospital do país.

- Ozônio para conservação de flor recém cortada:

Mais uma aplicação inusitada para este gás de múltiplas aplicações é o uso para conservação de flor recém cortada. Uma série de fatores influencia na longevidade da flor recém-cortada, desde a colheita, manipulação, armazenagem, transporte entre outros.

O balanço hídrico, resultado entre as entradas de água pelo talo e as saídas de água devido à transpiração, é um parâmetro de referência. Com o passar do tempo, os microrganismos que parasitam a flor interrompem os condutos de alimentação do xilema. Além disso, uma perda progressiva no vigor das pétalas que coincide com um incremento do conteúdo de determinados hormônios como o etileno, que beneficia a desorganização das membranas celulares e as células das pétalas perdem progressivamente sua capacidade de reter a água.

O ozônio, com seu caráter virucida e bactericida, é capaz de eliminar microorganismos da flor recém cortada. Devido as características fortemente oxidantes do gás, é ideal para atacar duplas ligações de compostos olefinicos como o etileno. O ozônio não tem nenhum efeito secundário que possa ser prejudicial para a flor recém cortada e sua administração no estado gasoso permite a inibição e eliminação do etileno presente nos locais de armazenamento da flor recém cortada e que muitas vezes provem de outros produtos vegetais possivelmente armazenados no mesmo lugar.

Também é muito comum a conservação da flor recém cortada em câmaras frigoríficas, as quais devem estar em ótimo estado higiênico-sanitário. Para isso normalmente se utilizam diferentes compostos químicos para desinfecção periódica. O ozônio pode suprir perfeitamente o uso de todos estes produtos, pois seu poder desinfetante é superior em 100 vezes ao do cloro tanto a nível fungicida e bactericida.

O tratamento da flor recém cortada com água previamente ozonizada produz toda uma série de efeitos positivos sobre a mesma, com maior duração da flor recém cortada. Além destes efeitos benéficos, algumas características são alteradas, como pétalas menos atrofiadas, talos de melhor textura, aumento da duração das pétalas e melhor abertura dos mesmos e nenhuma alteração na cor da flor.

- Ozônio: tecnologia emergente na cadeia de pescados:

Pesquisadores destacam que nos últimos anos, atenção crescente tem sido focada na segurança dos alimentos e, em especial sobre os métodos de intervenção para reduzir e eliminar os patógenos a partir de produtos frescos, especialmente frutos do mar. O cloro é o agente saneante mais utilizado, mas tem um efeito limitado na eliminação de bactérias e deixa resíduos químicos no alimento.

O uso de ozônio no armazenamento de alimentos tem sido aplicado em câmaras de congelamento e armazéns (carnes, mariscos, frutas, legumes, queijos, enchidos, etc.) O objetivo principal é reduzir o índice bacteriológico que ocorre nos sistemas de armazenamento, obter maior durabilidade dos alimentos (em refrigeração, congelamento ou armazenamento fresco) e eliminando as

bactérias para não permitir o crescimento em carnes ou outros, a formação de fungos, etc.

O ozônio molecular e seus produtos de decomposição destroem os microorganismos devido aos seus efeitos nas enzimas intracelulares, ácidos nucléicos e outros componentes celulares dos microrganismos. Além disso, o pescado tratado com ozônio apresenta melhor aspecto sensorial, evitando a formação de fungos e putrefação. Em adição, uma desinfecção das câmeras é obtida, com consequente vantagem para a manutenção. No peixe fresco e de moluscos bivalves, a aplicação de ozônio elimina o cheiro característico que às vezes pode ser desagradável, dando um aspecto saudável a esses frutos do mar. É aconselhável considerar que o ozônio, neste caso, não tem que ser usado para mascarar a baixa qualidade evitando, assim, a fraude econômica.

Tilápias foram armazenadas a 0 e 5°C, depois de um pré-tratamento do peixe vivo com ozônio (6 ppm). A análise sensorial mostrou que o tratamento prévio de ozônio prolonga o tempo de prateleira (armazenamento) por 12 dias (40%). A combinação de pré-tratamento com ozônio e estocagem a 0°C parece ser um meio viável de prolongar a vida útil de armazenamento de peixes, e alargar a sua comercialização e potencial de exportação.

A água ozonizada para mergulhar e lavar os filetes de peixe ou peixe mostrou uma redução efetiva da flora microbiana e, simultaneamente, não teve efeito sobre o produto.

Legislação em diferentes países:

- Nos Estados Unidos, o FDA aprovou o uso do ozônio como agente antimicrobiano para o contato direto com todos os alimentos e produtos alimentares (junho, 2001).
- O Ministério da Agricultura dos Estados Unidos aprovou-a como agente antimicrobiano para o contato direto com carnes, aves, peixes, moluscos e crustáceos (Dezembro, 2001).
- O governo do Japão, em 1996, admitiu sua utilização para o contato direto com todos os tipos de alimentos. O ozônio aparece em uma lista similar de FDA como “geralmente reconhecido como seguro (GRAS). Os barcos de pesca japoneses utilizam água ozonizada rotineiramente para lavar o peixe fresco, para fazer o gelo com água ozonizada e embalá-lo a bordo.

- A *Canadian Food Inspection Agency* (CFIA) aprovou o uso do ozônio para a limpeza das superfícies de contato do alimento.
- O governo da Austrália (também em 1996) autorizou o uso do ozônio para o contato com todos os alimentos – similar à aprovação do Japão.
- Os barcos de pesca alemães também usam ozônio na água e gelo.

- Estudo revela que nadar em piscinas cloradas pode levar ao câncer:

Investigadores espanhóis publicaram um estudo que demonstra que nadar em piscinas cloradas pode causar um risco aumentado de câncer nos banhistas.

Pesquisadores do Centro em Epidemiologia Ambiental (CREAL), com sede em Barcelona e do Instituto de Pesquisa do Hospital do Mar estudaram mudanças nos indicadores de mutagenicidade – mutação permanente do DNA – entre um grupo de nadadores de uma piscina clorada.

As evidências de efeitos genotóxicos foram observadas em 49 adultos saudáveis depois de nadar por 40 minutos em uma piscina clorada coberta, revelaram os autores.

Os investigadores encontraram indicadores de um aumento no risco de câncer em indivíduos saudáveis, bem como potenciais efeitos respiratórios do cloro usado como desinfetante. O estudo foi publicado na revista *Environmental Health Perspectives* (EUA).

Mais uma vez o ozônio apresenta-se como uma alternativa para desinfecção de águas. No caso das piscinas, o uso de cloro torna-se reduzido, e os efeitos do cloro são mínimos, já que o ozônio oxida as cloraminas, residual deixado pelo cloro nas piscinas.

- Ozônio é usado para controle de pragas em grãos armazenados:

Métodos químicos são utilizados para controlar praga em grãos armazenados, inseticidas como os piretróides, os organofosforados e os fumigantes como a fosfina (PH₃) são as opções mais utilizadas.

Por tratar-se de produtos altamente tóxicos, com efeitos residuais, alternativas a estes produtos estão sendo desenvolvidas pela comunidade científica em diversas partes do mundo. O ozônio novamente aparece como uma solução ecologicamente correta para este fim. Devido a característica oxidante e sem efeito residual, tem grande potencial para utilização neste contexto.

Resultados de pesquisas conduzidas na UFV indicaram o controle de 95% dos insetos-praga *Sitophilus zeamais* (caruncho dos cereais) e *Tribolium castaneum* (besouro dos cereais) num período de 24 h e 64 h, respectivamente. Isto considerando uma massa de grãos armazenada a 25°C e os insetos expostos diretamente ao gás ozônio numa concentração de 50 ppm.

O tempo de exposição necessário para o controle das pragas depende de fatores como a temperatura da massa de grãos e a camada em que os insetos estão localizados na mesma.

A tecnologia de ozônio tem sido utilizada há mais de 100 anos para tratamento de águas e outras aplicações, mas no âmbito da armazenagem de grãos, ainda é limitado a experimentos. Seu uso pode se tornar uma grande ferramenta na conservação e ou preservação da qualidade do produto armazenado.

- Tratamento de Gases:

Moléculas aromáticas, tóxicas, poeira e microrganismos são contaminantes comuns do ar. O uso de tecnologia de ozônio pode contribuir para elevar os padrões de qualidade do ar, seja por controle microbiano, seja por oxidar moléculas tóxicas ou de odor. O ozônio é uma alternativa para controle da contaminação ambiental em locais de grande fluxo de pessoas ou que requeira controle ambiental específico.

Pode ser utilizado para purificação do ar em ambientes de hospitais, aeroportos, teatros, hotéis, bancos entre outros. A tabela 8 apresenta alguns componentes de odor e a eficiência do ozônio contra eles.

Tabela 8. Eficiência do ozônio em componentes de odor

Componentes de Odor	Eficiência do O₃
Acetaldeído	96%
Amônia	70%
Metil mercaptano	100%
Sulfeto de hidrogênio	97%
Dissulfeto de Metila	97%

(Fonte: O3R The Ozone Way, 2011)

- Ozônio na indústria de alimentos:

O ozônio vem ganhando espaço no processamento de alimentos devido ao seu alto poder de desinfecção e devido sua capacidade de rápida degradação, sendo o oxigênio seu único resíduo. Essas propriedades intrínsecas permitem a ingestão de alimentos ozonizados sem riscos à saúde. Decorrente dessas vantagens, o ozônio já vem sendo utilizado na manipulação e no processamento de alimentos de origem vegetal e animal com garantia na higiene, cor, odor e aspecto visual, sem deixar resíduos que possam provocar reações indesejáveis.

O ozônio melhora a qualidade e realça o sabor da maioria dos alimentos perecíveis, pois oxida os pesticidas e neutraliza os gases de amônia e etileno produzidos durante os processos de amadurecimento e decomposição. Os pesticidas *methylparathion*, *parathion*, *diazinone* *cypermethrin*, largamente utilizados em frutas, são totalmente oxidados pelo ozônio em concentrações de 1,4 ppm por cinco minutos.

Com o objetivo de conservar os alimentos, o ozônio pode ser utilizado na forma gasosa em câmaras frigoríficas, silos e depósitos de alimentos, protegendo e conservando cereais, frutas, hortaliças, carnes e laticínios. Como a maioria das perdas pós-colheita e as perdas decorrentes da manipulação excessiva de alimentos ocorrem por ação de bactérias, fungos e infestações por insetos, a injeção direta de gás ozônio em depósitos mantém o ambiente limpo e esterilizado, mesmo quando há altos índices de calor e umidade, o que assegura maior tempo de armazenamento e vida útil dos alimentos. De outra maneira, o ozônio pode também ser utilizado dissolvido em água na lavagem de alimentos, a exemplo do que ocorre nos Estados Unidos na etapa de lavagem de carcaças de frangos, em batedouros frigoríficos.

O processamento de alimentos com ozônio é uma alternativa ambientalmente apropriada para os saneantes químicos, pode ser utilizado em todas as etapas da cadeia de alimentos, da limpeza das instalações, no processo, ar, águas de abastecimento e efluentes. O ozônio aumenta a segurança de alimentos frescos, amplia a vida de prateleira “organicamente”. O FDA permite/recomenda o uso de ozônio no processamento de alimentos, ou como aditivo direto em alimentos.

Dentre os benefícios oferecidos pelo uso do ozônio, pode-se destacar: aumenta a vida de prateleira, textura e padrão sensorial de pescados, solução livre de produtos químicos para aquacultura, frigoríficos. É extremamente eficiente no controle microbiano em temperatura ambiente, reduzindo ou eliminando o uso de água quente, elimina necessidade de aquisição de insumos químicos e é apropriado para produção orgânica.

Aplicações específicas:

- Ovos: Sanitização de toda casca para eliminar bactérias potencialmente patogênicas.
- Frutas e vegetais: Lavagem com água ozonizada desinfeta e mantém propriedades organolépticas, além de aumentar a vida de prateleira.
- Aves: Sanitização das águas de lavagem para reduzir bactérias patogênicas, e reciclagem ou reuso da água.
- Frutos do mar: Processamento de frutos do mar.
- Vinícolas: Sanitização da água fria, substituindo processo tradicional com água quente e uso de métodos químicos tradicionais.
- Grãos: Ozônio como substituto de água clorada para controle bacteriano no processamento de grãos.
- Peixes: Tratamento da água em tanques de aquí- cultura.

- Uso de Ozônio em Lavanderias:

O ozônio tem propriedades notáveis para a aplicação em lavanderias comerciais:

- É um poderoso desinfetante e oxidante, portanto, capaz de desinfetar os microorganismos que contaminam roupas e para oxidar carga orgânica.
- Pode ser eficaz em sistemas de lavagem de roupa apenas em temperatura ambiente (fria).
- Capacidade de desinfetar/oxidar rapidamente e decompõe-se em oxigênio, não gerando subprodutos tóxicos no meio-ambiente.

Estas vantagens do ozônio para uso em lavanderias comerciais foram inicialmente utilizadas no início dos anos 90 nos EUA. Os equipamentos de lavanderias comerciais são construídos de aço inoxidável para resistir à corrosão

por agentes químicos fortemente alcalinos utilizados na lavagem convencional, sendo totalmente adaptável para a tecnologia de ozônio.

O ozônio também oferece benefícios econômicos significativos para os processos de lavagem. O fato de que deve ser usado com água a temperatura ambiente, traz economia de energia que seria necessária para aquecer a água no sistema convencional. Além disso, a habilidade do ozônio para desinfetar e oxidar reduz as quantidades de produtos químicos utilizados convencionalmente. Por sua vez, este benefício reduz o número de ciclos de enxágue necessários. Menos ciclos de lavagem em temperaturas ambiente refletem em resultados de economia de energia e água, proporcionando uma lavagem de qualidade superior. Menos ciclos de enxágue também significa que mais roupas podem ser lavadas no mesmo período, reduzindo assim o tempo da equipe de trabalho.

Adequadamente projetado, instalado e controlado, sistemas de ozônio podem economizar cerca de 50% dos custos de lavagem convencional.

Distintos sistemas de lavanderias comerciais com ozônio evoluíram ao longo dos anos. Um número estimado de 2.000 sistemas de lavanderias comerciais foram instalados nos EUA em 2009. Os departamentos de saúde pública dos Estados de *Missouri* e *New Hampshire* têm formalmente aprovado uso do ozônio em lavanderia, e outros estados estão avaliando.

No Reino Unido, um fornecedor de grandes equipamentos de lavanderia que tem muitos clientes em hospitais, asilos e estabelecimentos de saúde ficou atento com a crescente epidemia de microrganismos super resistentes [*Staphylococcus aureus* resistentes à metilina (MRSA) e *Clostridium difficile* (CDiff)] que se espalha nestes ambientes e no final dos anos 90, reconheceu os potenciais do ozônio para combater estes microrganismos, adaptando a tecnologia para os sistemas comerciais.

- Uso do Ozônio em Água Mineral:

O Brasil é o sétimo maior consumidor de águas engarrafadas no mundo, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A água mineral natural deve apresentar qualidade que garanta ausência de risco à saúde do consumidor, devendo ser captada, processada e envasada obedecendo às condições higiênico-sanitárias e as boas práticas de fabricação, sem alterar suas características originais.

A sanitização inadequada das embalagens ou a sua contaminação posterior resulta na condenação do lote de água mineral. Segundo o Ministério da Saúde, neste produto não podem ser constatadas as presenças de *E. coli* ou *coliformes* (fecais) *termotolerantes* ou *coliformes totais*, *enterococos*, *P. aeruginosa* e/ou *clostrídios sulfito redutores*, em quantidade superior a 2 UFC/mL.

Numerosos compostos químicos utilizados na desinfecção provocam efeitos mutagênicos, com perigos referentes a resíduos potencialmente carcinogênicos nos alimentos ou embalagens.

O gás ozônio apresenta características sanitizantes atraentes para a indústria alimentícia, por ser mais seguro e potente do que os desinfetantes convencionais, agir sobre um grande número de microrganismos, incluindo patógenos resistentes. Além de ser reconhecido como seguro para o tratamento de garrafas de água (“*General Recognized As Safe*”-GRAS) pela “*Food and Drug Administration*” americana, ser utilizado efetivamente no tratamento da água para o consumo na Europa há mais de cem anos e na indústria de alimentos por décadas, o ozônio não deixa resíduos tóxicos nos alimentos, capazes de alterarem o odor e o sabor dos mesmos.

Na água engarrafada, a água ozonizada é recomendada pela *Intertional Bottled Water Association* (IBWA). O ozônio pode reduzir ou mesmo eliminar a necessidade de desinfecção química ou processos de altas temperaturas, com conseqüente redução de custos, com grandes benefícios, os quais vêm sendo registrados em todas as partes do mundo.

O ozônio agrega os seguintes valores à indústria de bebidas:

- O ozônio é muito superior a qualquer outro método de limpeza, devido ao seu elevado poder oxidante.
- Permite reduzir custos operacionais.
- Redução de custos globais com produtos químicos, dentre outros, em quaisquer plantas industriais.
- Transmite confiabilidade, devido às suas características.
- O elemento tipicamente não está associado a subprodutos e contaminação, revertendo-se ao oxigênio (O₂).

Como é gerado no próprio local de utilização, o ozônio não requer cuidados especiais em relação ao armazenamento e manipulação.

O IBWA sugere um residual de 0,2 a 0,4 ppm de ozônio na água engarrafada. No Brasil, muitas empresas utilizam o ozônio para sanitização de embalagens.

- Ozônio na Piscicultura:

O ozônio é um dos mais poderosos agente oxidantes conhecidos e, também um agente anti-microbiano de amplo espectro, sendo usado para as mais diversas finalidades, sendo a principal o tratamento da água. O ozônio não é um aditivo, pois não permanece. Ele degrada a maioria dos poluentes, destrói os contaminantes e, deixa na água como resíduo, oxigênio dissolvido. Na utilização em piscicultura, o ozônio oxida o plâncton, algas, microrganismos contaminantes, matéria orgânica, ferro e manganês, agindo ainda sobre bactérias, fungos, protozoários e alguns tipos de vírus. Quando usado de forma e com doses corretas, o ozônio é um excelente agente, algicida, bactericida e fungicida, garantindo maior saúde e segurança à vida dos animais cultivados.

- Ozônio e Ecotoxicologia: escolha sustentável:

Uma publicação no 6th *International Symposium on Ozone Applications and V International Symposium on Environment*, destacou o uso do ozônio como alternativa para tratamento de efluentes.

O aumento da industrialização e mudança de comportamento social estão impactando diretamente as características do esgoto a ser tratado. Emergentes níveis de toxicidade, com aumento da concentração de produtos farmacêuticos, inclusive hormônios, ocorrendo principalmente nos efluentes domésticos, estão lesionando os ecossistemas aquáticos.

Encontrar soluções e processos para que possam simultaneamente realizar desinfecção das águas residuais e atacar estes poluentes emergentes (hormônios e outros fármacos) é uma preocupação social forte. O trabalho desenvolvido pelo autor teve o objetivo de avaliar a eficácia da tecnologia de ozônio para desinfetar e reduzir essas emissões emergentes de micropoluentes em águas residuais domésticas e industriais. Os diferentes contaminantes avaliados foram os *coliformes termotolerantes* e *enterococos*, bem como a toxicidade, resíduos farmacêuticos, agentes de superfície e *nonyphenols*. No caso do efluente industrial, principalmente, os resultados

demonstraram que a toxicidade do efluente foi reduzida em cerca de 30% para 55% quando o efluente foi tratado com as concentrações de ozônio variando de 12 mg/L a 20 mg/L de O_3 . Houve redução significativa dos coliformes termotolerantes e de esporos. Mais de 70% dos principais produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais encontrados no esgoto foram reduzidos no esgoto tratado com ozônio.

Resultados similares foram observados para as águas residuais domésticas. Além disso, o nível de toxicidade foi reduzido entre 10% – 20%. Em ambos os casos, o tratamento do efluente com ozônio em baixas concentrações efetivamente transforma o esgoto e melhora o seu odor. Os resultados mostram que o ozônio é eficaz na desinfecção e na redução dos poluentes emergentes em ambos os efluentes do tipo primário de águas residuais domésticas e industriais.

A utilização do ozônio é uma tecnologia capaz de tratar simultaneamente os contaminantes encontrados nas águas residuais de hoje. Combinado com uma abordagem ecotoxicológica, o ozônio pode ser considerado como uma solução eficaz para os problemas agora enfrentados por inúmeras instalações que cuidam destas águas residuais.

Atua na redução de DBO, DQO, sólidos, saturação do efluente com OD, tem efeito de coagulação, controle de turbidez, remoção de cor, sabor e odor, oxidação de compostos fenólicos, controle de crescimento de algas, estabilização biológica, oxidação de pesticidas entre outros.

A desinfecção de águas residuárias é um processo de tratamento indispensável à proteção da saúde pública. O ozônio é um desinfetante alternativo ao cloro, já que é muito efetivo contra grande variedade de organismos patogênicos. É efetivo contra vírus, fungos, bactérias, protozoários, capaz de tratar efluentes ricos em metais (Fe, Mn, etc.), cianeto, cloraminas, corantes, etc.

É também muito utilizado para maximizar a remoção de DQO e DBO. O tratamento com ozônio se apresenta como tecnologia muito promissora para a remoção de matéria orgânica recalcitrante. É também utilizado industrialmente no pós-tratamento para remoção de cor, com destaque a reconhecida eficiência do ozônio em aumentar a biodegradabilidade dos efluentes.

- Propriedades do ozônio medicinal:

Diferente do ozônio utilizado para fins industriais, o ozônio medicinal é obtido a partir do oxigênio medicinal puro (MedO₂), do qual se obtém uma mistura de oxigênio/ozônio em concentrações e doses exatas. Sua concentração varia de 1 a 100 microgramas por mililitro (µg/ml), correspondendo a uma mistura de oxigênio/ozônio em relações entre 0,05% de ozônio e 99,95% de oxigênio a 5% de ozônio e 95% de oxigênio.

A ozonioterapia é uma técnica que utiliza o ozônio medicinal como agente terapêutico em um grande número de patologias, em função do seu efeito multifocal sistêmico. É uma terapia natural, com poucas contra-indicações e efeitos secundários mínimos, se indicada e realizada corretamente por profissional com formação adequada.

O sistema de saúde da Alemanha, Itália e de outros 16 países reconhecem o uso desta técnica para diversas patologias. Cuba conta com 39 centros clínicos de ozonioterapia e na Rússia é utilizada em todos os hospitais governamentais.

Atualmente no mundo, cerca de 50.000 médicos regularmente inscritos em sociedades científicas de ozonioterapia situadas em Cuba, China, Rússia, Alemanha, Suíça, Áustria, Itália, Ucrânia, Espanha, França, Grécia, Japão, Canadá, alguns estados dos Estados Unidos da América, Polônia, Egito, Israel, Austrália, México, Argentina, e Venezuela. Juntos, fazem mais de 10.000.000 (dez milhões) de terapias por ano. Estes números, associados a mais de 100 anos de história, à comprovada segurança e eficácia que a medicina baseada na evidência nos fornece (são 1897 referências encontradas no site www.pubmed.com), fazem da ozonioterapia uma realidade mundial.

As aplicações de ozonioterapia são determinadas por suas propriedades antiinflamatórias, antissépticas, de modulação do estresse oxidativo, da melhora da circulação periférica e da oxigenação. Isto determina o amplo número de patologias em que pode ser utilizada de modo isolado ou complementar.

Dessa maneira, podem ser tratadas pela ozonioterapia as patologias de origem inflamatória, infecciosa e isquêmica, geralmente relacionadas a alterações do estresse oxidativo.

O ozônio de uso médico pode ter diferentes propriedades, a depender da concentração da mistura oxigênio/ozônio. Possui propriedades bactericidas, fungicidas e virustáticas, pelo que é largamente utilizada para tratamento de

feridas infectadas, assim como em doenças causadas por vírus, bactérias e fungos.

Por sua habilidade de estimular a circulação, a ozonioterapia é usada no tratamento de doenças circulatórias. Quando utilizado em baixas concentrações, a resistência do organismo humano é mobilizada, ou seja, o ozônio ativa o sistema imunológico. Através do ozônio, as células imunológicas do corpo produzem citocinas (incluindo mediadores importantes como *interferons* e *interleucinas*), estas sinalizam informações para outras células, ativando a cascata imunológica e promovendo o reequilíbrio orgânico.

Em resumo: em função de suas propriedades físico-químico-biológicas, a mistura oxigênio/ozônio pode, no entanto, ser utilizada em tratamentos de um grande número de afecções. Graças às suas propriedades seletivas, o ozônio medicinal é utilizado em diferentes campos, algumas vezes como viga mestra do tratamento, outras como mero coadjuvante, destacando-se:

- Tratamento de doenças de ordem circulatória e metabólica.
- Tratamento de doenças produzidas por vírus, como hepatites e herpes.
- Tratamento de feridas e processos inflamatórios: úlceras cutâneas crônicas (varicosas, associadas ao pé diabético), inflamações intestinais e ginecológicas, queimaduras, feridas infectadas, infecções por fungos, etc.
- Condições inflamatórias, reumáticas e imunológicas.

- Jeans Eco-friendly com Ozônio:

Os jeans ecologicamente corretos foram destaque na segunda edição da feira *Première Brasil*, em São Paulo. A linha promete respeitar o meio ambiente em todo seu ciclo produtivo. O “jeans 100% reciclado” é um tecido que não necessita de lavagem industrial, o que significa grande economia de água e energia. Sem essa etapa, também não contempla a utilização de materiais tóxicos no tecido, que em muitos casos provocam alergias e podem acabar em afluentes, contaminando as águas dos rios e lençóis freáticos.

- Tratamento de Águas:

Devido ao seu poder oxidante, o ozônio é utilizado no tratamento de água para uma variedade de propósitos. É capaz de produzir desinfecção com menos

tempo de contato com os agentes infectantes e com concentração menor que outros desinfetantes, como cloro.

Pode também ser utilizado para oxidação de compostos inorgânicos, incluindo ferro, manganês e sulfito; oxidação de micropoluentes orgânicos, inclusive compostos que causam sabor e odor, poluentes fenólicos e alguns pesticidas, oxidação de macropoluentes orgânicos, removendo cor, aumentando a biodegradabilidade dos compostos orgânicos.

Aplicações específicas:

- Águas de abastecimento: O ozônio é utilizado em águas de abastecimento (municipais, industriais), para oxidação de metais (ferro e manganês), microcontaminantes orgânicos (fenóis, detergentes, pesticidas), eliminação ou redução de THM (*trihalometanos*), controle ou redução de DQO (Demanda Química de Oxigênio), controle de cor e odor, e desinfecção.
- Engarrafadoras de água mineral: O processo de sanitização dos galões de água mineral, bem como os condutos, canalização, depósito e utensílios que entram em contato com a água da fonte poderão ser higienizados com água ozonizada (Resolução no. 25/76 da Comissão de Normas e Padrões para alimentos).
- Aquicultura: O ozônio é capaz de oxidar a matéria orgânica parcial ou totalmente, precipitar o material dissolvido, reduzir os níveis de nitritos, aumentar a quantidade de oxigênio dissolvido e atingir níveis elevados de desinfecção.
- Controle de biofilme: O ozônio é capaz de reduzir ou eliminar a produção de biofilme em tubulações ou redes de água purificada, industrial e potável.
- Sistemas de limpeza CIP e WIP: Devido às características oxidantes, o gás ozônio é capaz de conferir efetividade nos sistemas de limpeza de reatores de processo (*Clean in Place*) de fármacos, químicos, pesticidas e tanques de alimentos líquidos, como vinhos, cervejas, sucos, etc.
- Torre de Resfriamento: O ozônio tem habilidade de evitar incrustação e formação de biofilme.

Águas de alta qualidade: Indústrias farmacêuticas e eletrônicas necessitam de água com alto padrão de qualidade, com rigorosos requisitos. O ozônio, com seu

poder oxidante e desinfetante pode ser utilizado como parte do processo de purificação e sanitização das linhas, com vantagem econômica.

- Clarificação do Caldo de Cana de Açúcar:

A utilização de enxofre no processo de branqueamento do açúcar aos poucos vai perdendo espaço nas usinas do Nordeste. Algumas indústrias estão trocando o material, que é considerado nocivo à saúde, pelo ozônio. Além de garantir um produto mais saudável, tanto para consumidores quanto para as pessoas envolvidas na fabricação, e reduzir a emissão de poluentes, a substituição ajuda a agregar valor ao produto final. É o caso da Usina Monte Alegre, na Paraíba, que há três safras deixou de utilizar o enxofre na produção de açúcar cristal. “A substituição pelo ozônio trouxe vários ganhos. A aplicação é mais prática, e causou uma melhoria na qualidade de vida. A usina deixou de lançar gases tóxicos na atmosfera, enquanto o açúcar deixou de ter resíduos”, explica a gerente industrial da empresa. O açúcar, fabricado pela usina, já é comercializado no varejo com o selo Sem Enxofre. Nesta safra, foram produzidos 926 mil sacos de 50 quilos do produto. Embora a produção seja toda destinada ao consumo interno, a mudança pode ser um diferencial para os mercados externos. Para exportar, já há limitações da quantidade de resíduo de enxofre no açúcar.

O ozônio faz o açúcar mais alvo do que o enxofre, sem deixar resíduos. Começou na Usina Monte Alegre, na Paraíba, e atualmente outras usinas já fazem o processo. O processo de clareamento com ozônio tem relação com o potencial de oxidação do gás, quase três vezes maior que o do cloro e duas vezes mais alto que o do enxofre. O resultado é um açúcar mais claro e sem resíduos, pois em contato com a água, o ozônio (O_3) volta a ser oxigênio (O_2) e água. Ao contrário do enxofre, que em contato com a água forma diversos ácidos, que acabam sendo absorvidos pelo organismo com ingestão do açúcar.

O custo é o mesmo do processo comumente utilizado, mas os benefícios para a saúde são muito maiores. O produto tem um potencial de comercialização grande também, pois na Europa, onde a utilização do enxofre é totalmente proibida, são utilizados outros produtos químicos para o clareamento. Deve-se acabar com o enxofre no açúcar e este é um grande passo.

A Monte Alegre não é a única a fazer experiências sem enxofre. Embora ainda não tenha comercializado o produto, a Usina Sinimbu, em Alagoas, realizou

testes para a fabricação de açúcar cristal com ozônio no final da última safra. O resultado foi satisfatório, explica o gerente de produção da empresa. O ozônio reduz os custos com produtos químicos. O enxofre é um produto caro. O enxofre é corrosivo, cancerígeno e degrada o ambiente. A substituição do enxofre pelo ozônio faz com que as usinas consigam uma remuneração mais alta pelo açúcar. Os custos com o novo equipamento são os mesmos que o produtor tem com o enxofre. Além disso, a empresa vai ter um produto com valor agregado ainda maior.

O açúcar cristal branqueado pelo ozônio não tem diferença visual em comparação ao produzido com enxofre, afirmam os fabricantes. O sabor, contudo, pode ser diferente. As pessoas dizem que ele é mais doce devido à ausência de enxofre, que é ácido.

O pedido de patente PI0505003 (Patentes Online, 2012) refere-se a um método para ser aplicado na fase de clareamento do caldo de cana-de-açúcar, que dispensa totalmente o uso do Enxofre e da fórmula de circulação forçada para a queima do enxofre e obtenção do gás sulfídrico. O novo método injeta o ozônio na forma de gás diretamente na tubulação de entrada da coluna ou torre de clareamento. Além disso, o novo método não requer alteração na estrutura física dos equipamentos, exceto o isolamento da tubulação de entrada de enxofre e uma nova abertura por onde vai ser injetado o ozônio. O processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar por ozonização é caracterizado por utilizar apenas o ozônio (O_3) na forma de gás como elemento ativo para a oxidação e clareamento do caldo da cana-de-açúcar.

Qualquer iniciativa inovadora causa sempre polêmicas, mas ensina a enxergar outros horizontes. Na Usina Monte Alegre se faz um açúcar adequado ao seu mercado e com uma tecnologia pioneira, muito consistente, obtendo resultados imperativos, com equipamentos simples e pouca automação, o que faz refletir a respeito dos ganhos desta mesma tecnologia com o advento de recursos otimizados no processo. Fonte: jornal da cana.

2.13 Ozônio: Aliado e Inimigo

Uma pergunta muito comum quanto ao gás ozônio, é se este gás é bom ou ruim, principalmente quando uma notícia é divulgada alertando que os níveis de ozônio estão aumentados devido à poluição. Muitas pessoas questionam se este “ozônio” que tanto fala-se, produzido pelos geradores, é este mesmo ozônio considerado “mau”.

O ozônio, assim como outras moléculas, pode ser considerado uma molécula “boa” ou “má”. Um exemplo bem ilustrativo para exemplificar o que acontece na prática:

Num mercado de peixe aberto, o ozônio influencia as pessoas de três maneiras.

1 - Bom ozônio: 20 quilômetros acima deles ajuda proteger os olhos e a pele das radiações UV (camada de ozônio).

2 - Mau Ozônio: ao nível do solo, dependendo da concentração, prejudica os pulmões.

3 - Ozônio Bom e útil: O ozônio, utilizado em empresas próximas, mata fungos e bactérias, tira o mau cheiro.

No mercado do peixe, é útil para limpeza e conservação dos peixes. Quando utilizados pela estação de tratamento de água cidade, mata os microrganismos presentes na água e ajuda no processo de purificação, oxidando moléculas de ferro, etc. Tudo isso sem mencionar o ozônio de uso médico.

O ozônio mau é o ozônio encontrado na troposfera, produzido pelo homem, como o resultado da poluição do ar de motores de combustão interna e usinas geradoras de energia. O escapamento dos automóveis e as emissões industriais liberam uma gama de gases de óxido nitroso (NOx) e compostos orgânicos voláteis (VOC), subprodutos da queima de gasolina e carvão. O NOx e o VOC's combinam-se quimicamente com o oxigênio para formar ozônio durante dias ensolarados de altas temperaturas no final da primavera, verão e começo do outono.

Produção de ozônio a partir de poluentes NOx: os átomos de oxigênio liberados do dióxido de nitrogênio, pela ação da luz solar, atacam as moléculas de oxigênio e formam ozônio. O óxido de nitrogênio pode combinar-se novamente com ozônio para formar dióxido de nitrogênio, e o ciclo se repete.

A figura 26 apresenta um esquema de produção de ozônio a partir de poluentes.



Figura 26. Produção de ozônio a partir de poluentes
(Fonte: Ozonizando, 2011)

Esta é a equação geral que identifica os principais contribuintes para produção de ozônio na superfície: motores de automóveis produzem óxidos de nitrogênio (NOx), abastecimento de gasolina queimados, muito dos compostos orgânicos voláteis (COV's). Estes combinados com a energia do sol (raios UV) produzem níveis insalubres de ozônio. Esta fonte de poluição por ozônio recebe muita cobertura da mídia. Por isso o ozônio é considerado uma molécula controversa.

2.14 Fontes de Alimentação Eletrônicas

A maioria dos aparelhos eletro-eletrônicos necessita de fontes de alimentação estabilizadas em tensão contínua para o correto funcionamento dos circuitos envolvidos. No entanto, o fornecimento de energia pela concessionária é feita em tensão alternada, tanto para consumidores residenciais quanto para consumidores industriais. Faz-se necessário então a conversão da tensão alternada em tensão contínua em um processo denominado retificação.

As tecnologias atualmente empregadas na construção de fontes de tensão são basicamente três: ferro-ressonante, linear e chaveada.

As fontes ferroressonantes se baseiam no princípio de ferro-ressonância e são compostas basicamente por um transformador operando com o secundário

saturado. Operando em saturação, a densidade de fluxo no secundário é praticamente constante, fazendo com que a tensão de saída permaneça constante mesmo com variações (tipicamente da ordem de +15%) da tensão de entrada.

Embora a eficiência (parcela da potência total de entrada que é efetivamente transferida à carga) deste tipo de fonte seja elevada (da ordem de 70 a 80%), têm a desvantagem de em geral serem volumosas e pesadas.

As fontes de tensão lineares empregam elementos de controle (transistores) que, colocados em série ou em paralelo com a carga, fazem a tensão nesta permanecer constante como nos reguladores série e paralelo. Em geral não é possível manter a tensão V_{CE} baixa no caso do regulador série, fazendo com que haja uma grande perda de potência no transistor. O regulador paralelo é em geral utilizado apenas para pequenas correntes, já que possui um resistor em série com a fonte de entrada, causando uma grande perda de potência que é proporcional a corrente de carga.

De acordo com Mello (1988) apesar de proverem excelente regulação, as fontes de tensão lineares vem sendo cada vez menos utilizadas na prática, devido ao fato de apresentarem baixa eficiência. Em fontes lineares é difícil evitar que uma apreciável parte da potência de entrada seja dissipada pelo elemento de regulação, tornando difícil e onerosa sua construção para elevadas potências. Além disso, as fontes lineares ocupam grandes dimensões físicas devido à necessidade de dissipação de potência e provável utilização de um volumoso transformador de entrada para isolamento e transformação de tensão da entrada.

Características das fontes lineares:

- Transformador de baixa frequência, ponte retificadora, filtro capacitivo e regulador linear série.
- Elevada robustez e confiabilidade.
- Baixo custo.
- Simplicidade de projeto e operação.
- Elevado peso e volume.
- Baixo rendimento (reguladores lineares).
- Limitação na regulação.

- Geração de componentes harmônicas na corrente de entrada, resultando um baixo fator de potência.
- Atualmente limita-se a aplicações de baixa potência (simplicidade e baixo custo).

As fontes chaveadas são idealmente não dissipativas e, assim como as fontes ferroressonantes, provém elevada eficiência (acima de 70%). O fato básico que rege o funcionamento das fontes chaveadas (ou comutadas) está na capacidade de armazenamento de energia em capacitores (em forma de tensão) e em indutores (em forma de corrente).

Uma fonte chaveada em alta frequência é composta basicamente por: um circuito retificador de entrada, filtro de entrada, conversor CC/CC, retificador de saída, filtro de saída e circuito de controle.

A figura 27 apresenta o diagrama de blocos básico de uma fonte chaveada.

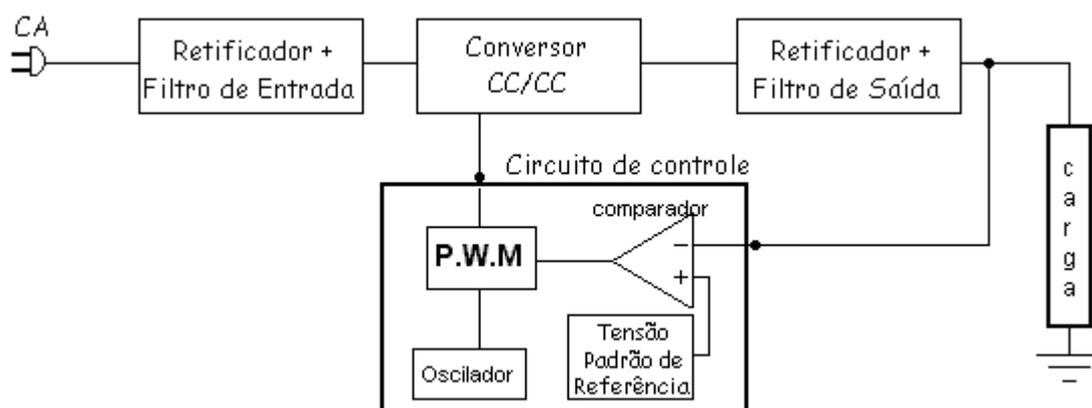


Figura 27. Diagrama de blocos de uma fonte chaveada (Mello, 1988)

Características das fontes chaveadas, Mello (1988):

- Elevado rendimento.
- Elevada densidade de potência: menor volume e peso.
- Grande capacidade de regulação.
- Possibilidade de operar com fator de potência unitário.
- Menos robusta e resposta transitória lenta.
- Maior ondulação na tensão de saída.
- Interferência radioelétrica e eletromagnética.

- Maior número de componentes.
- Componentes mais sofisticados.

Conforme apresentado na figura 28, existem diversas topologias para a conversão CC/CC, cada uma delas com características próprias, como a conversão *buck* que tem como característica um valor de tensão de saída menor que o valor da tensão de entrada (abaixador de tensão), conversão *boost*, que executa a elevação da tensão de saída em relação à entrada, conversão *flyback* ou Inversor que fornece uma inversão de polaridade na tensão de saída, ainda existem várias outras topologias derivadas da conversão *buck*, assim como a conversão *push-pull*, conversão *half-bridge*, conversão *full-bridge* e conversão *forward*. Portanto, é muito importante a escolha da topologia adequada para a aplicação no objeto de estudo.

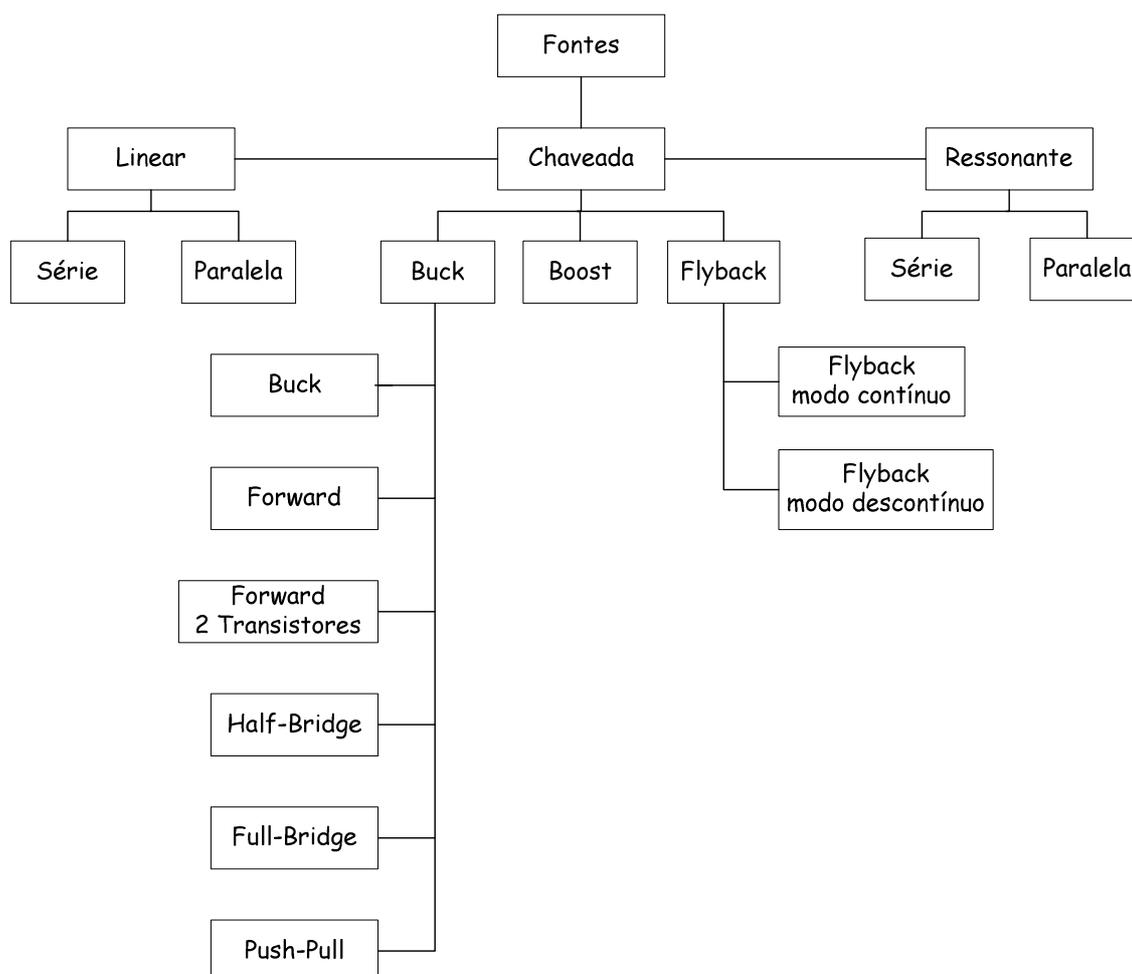


Figura 28. Tecnologias de fontes
(Fonte: Mello, 1988)

2.15 Controle Digital

A tecnologia de controle digital aplicada a conversores, permite a implementação de algoritmos mais eficientes e uma maior integração do sistema. Para a implementação do controle digital dos conversores é necessário conhecer alguns conceitos que são apresentados neste capítulo.

Evidencia-se, na literatura atual e em aplicações industriais, o uso cada vez mais frequente de técnicas de controle digital via microprocessadores no comando e controle de sistemas. Novas técnicas e equipamentos vêm surgindo em todas as áreas do conhecimento humano. Na Engenharia muitos dos admiráveis utensílios, que facilitam e agilizam a vida, trazem embutidas tecnologias, em que as soluções propostas muitas vezes são extremamente sofisticadas, tornando-as economicamente inviáveis e possivelmente não implementáveis por métodos clássicos da Eletrônica Analógica-Digital. O uso de microprocessadores e DSP's tem viabilizado a operação de sistemas que requerem processamento e controle mais refinados.

Com o avanço nas áreas de controle de processos, novas leis de controle cada vez mais eficientes têm sido estudadas e analisadas, conseguindo-se maior eficiência no controle de equipamentos. Porém o preço que se paga é tangente ao custo e à dificuldade de implementação de tais técnicas, ficando, às vezes, as soluções encontradas confinadas a aplicações apenas no campo teórico, por intermédio de simulações. Assim, os microprocessadores, cada vez mais sofisticados e atrativos financeiramente, são hoje notoriamente evidentes em uma grande gama de equipamentos e instrumentos, parecendo tornar-se uma tendência natural a migração para sistemas de controle digital baseados em microprocessadores. Pode-se citar as seguintes qualidades inerentes ao uso do controle digital:

- Flexibilidade na implementação do controlador dinâmico na malha de realimentação. Atribui-se a flexibilidade ao fato de a lei de controle dar-se por linhas de programação, bastando a reprogramação para se obterem diferentes tipos de controladores ou mesmo para efetuar ajustes no controlador.
- A capacidade de decisão lógica e de armazenamento de dados, característica de sistemas digitais, traz como atrativo a facilidade de

incorporação e uso de funções como alarme, o controle de partida suave ou de desligamento do processo, as funções de supervisão dos diversos componentes integrantes do processo, as sinalizações e as tomadas de decisões.

- Menor custo e maior confiabilidade no controle de processos que envolvam a implementação de várias malhas de um processo complexo, já que praticamente se trata do mesmo *hardware* utilizado para sistemas monovariáveis, pois muitas vezes o sistema já disponibiliza diversas entradas A/D e D/A, podendo-se monitorar sistemas multivariáveis.
- Maior imunidade a ruídos, pelo fato de que, uma vez feitas adequadamente as aquisições dos sinais pertencentes ao sistema, os dados são armazenados na memória e submetem-se apenas às manipulações e transferências internamente no processador, desta forma ficando ele imune a ruídos provocados pelos elementos analógicos do sistema exterior.

Algumas desvantagens também existem:

- O custo pode tornar-se elevado. Um exemplo seria nas aplicações de controle menos sofisticadas e de baixo custo, em que o processo pode ser controlado com o emprego de controladores convencionais. Em casos como esse, o custo do sistema de controle baseado em processadores pode comprometer o custo final do projeto. Não é muito simples ponderar esses fatores, faz-se necessário observar com mais cuidado o processo a ser controlado, a fim de evitar desperdícios dos componentes na capacidade de processamento, memória, periféricos, etc.
- A complexidade da análise e do projeto no domínio discreto, visto que existem vários problemas a considerar, tais como erros de quantização, período de amostragem do sinal e a resolução dos conversores A/D e D/A. Quanto ao tipo de microprocessador, também devem ser analisados os seguintes aspectos: ponto fixo ou ponto flutuante, memória necessária, periféricos necessários, noção de lógica, algoritmos e programação.

Em grande parte das aplicações em Eletrônica de Potência, como retificadores, conversores CC/CC, inversores e UPS, necessita-se de controle, supervisão e regulação das variáveis de tensão e corrente, por exemplo. O controle dessas variáveis pode ser realizado por meio do comando adequado dos interruptores da estrutura de potência em questão. Pode-se citar um método que é normalmente empregado, no qual se tem a variação do tempo de condução dos interruptores em relação ao período de comutação. Esta técnica é chamada de PWM (modulação por largura de pulso) e vem sendo empregada ao longo dos tempos.

Com o avanço tecnológico novos componentes têm sido desenvolvidos no intuito do controle e geração mais simples e econômicos desse tipo de modulação (PWM), entre os meios emergentes, destacam-se componentes eletrônicos desenvolvidos especificamente para esse fim, e o uso cada vez mais frequente de técnicas digitais microprocessadas.

Mediante o comando adequado, pode-se controlar as estruturas de Eletrônica de Potência. Isso se traduz em diversas aplicações, tais como:

- Controle de máquinas.
- Fontes de alimentação com alta densidade de potência.
- UPS (*no-breaks*).
- Sistemas eletrônicos para iluminação.
- Sistemas eletrônicos para o acionamento de motores elétricos.
- Unidades retificadoras para telecomunicações.
- Carregadores de bateria.
- Estabilizadores de tensão.
- Sistemas eletrônicos para aquecimento resistivo e indutivo.
- Processamento de energia fotovoltaica.

2.15.1 Microprocessadores, Microcontroladores, DSP's e DSC's

De uma forma geral, todos são circuitos integrados disponíveis nos mais variados tipos de encapsulamentos e destinados ao tratamento de sinais digitais.

Primeiro vieram os microprocessadores, substituindo milhões de transistores nos computadores, que chegavam a ocupar um andar de um prédio e após esta invenção diminuíram consideravelmente de tamanho. São usados principalmente para processamentos complexos e possuem alto custo. Dentre algumas aplicações estão presentes nos microcomputadores pessoais, em aparelhos eletrônicos de uso doméstico e nos equipamentos médicos.

Este circuito integrado não consegue fazer nada sozinho, pois são necessários outros dispositivos externos para que ele se torne útil. É uma memória de programa, que deve conter o programa que será executado pelo microprocessador. Necessita inclusive barramentos entre essa memória e o microprocessador, que são a ligação física entre a memória e o microprocessador (fios ou trilhas). No caso de um barramento de dados de 16 bits, haverá 16 fios ou trilhas comunicando os dois. Existe a necessidade também do barramento de endereços, o qual seleciona o endereço em que o dado será lido ou escrito na memória. Desta forma, em um microprocessador deve ser acoplado externamente todo componente necessário para o cumprimento da aplicação.

Os microcontroladores, em geral, possuem todos os periféricos necessários em um único chip. Seu tamanho também é muito pequeno, mesmo contendo vários periféricos como: memórias, barramentos, *timer's*, portas de comunicação, conversores de sinal analógico para digital, etc. Eles possuem desempenho menor que os microprocessadores, mas são ideais em aplicações que necessitam de menores dimensões, tempo e custos.

Este dispositivo é amplamente usado em automação industrial, residencial e predial, eletrodomésticos, brinquedos eletrônicos e em qualquer situação em que seja necessário o controle de um dispositivo de sinais eletrônicos. Por exemplo, em um elevador, quando alguém aperta um botão para ir até um andar específico, o microcontrolador recebe essa informação como um dado de entrada, interpreta-o e aciona os motores do elevador até aquele andar, pára e abre as portas.

O processador digital de sinais (DSP) vem do inglês “*Digital Signal Processing*” e pode definir tanto o processador quanto o processo em si. Difere dos processadores genéricos na sua arquitetura de *hardware*, *software* e no conjunto de instruções otimizado para o tratamento digital de sinais. Esse tipo de tratamento exige um alto desempenho para aplicações numéricas em tempo real, as quais seriam impossíveis de serem realizadas por circuitos analógicos. Além de ser um sistema flexível devido à sua característica de reconfigurabilidade, o DSP oferece inúmeras vantagens em relação a outros sistemas ou dispositivos.

Ele é projetado para realizar diversas manipulações e transformações matemáticas em um conjunto de números extraídos do mundo real (analógico) rapidamente. Os humanos adquirem dados analógicos do mundo real, como o som, as imagens, a temperatura e a intensidade luminosa, processam essas informações para realizar uma série de ações a partir dessa entrada. Tudo isso acontece a todo momento, e denomina-se tempo real .

Os DSP's também operam em tempo real, tratando sinais contínuos, assim como os seres humanos. Para isso é necessário o conversor analógico-digital (A/D), que captura os sinais contínuos da natureza (analógicos) e os transforma em dados digitais discretos. É nessa informação digital que o processador deve efetuar operações complexas que levarão a um novo dado digital que passará por um conversor digital-analógico (D/A), que é entregue ao meio em tempo real.

Para ilustrar essa situação, imagine um processo de filtragem de áudio. O conversor A/D adquire o sinal de áudio e o entrega ao DSP como uma seqüência de amostras individuais (pontos capturados). Para realizar o algoritmo de filtragem em tempo real, o DSP deve efetuar todos os cálculos e operações necessárias para o processamento de cada amostra e entregá-las ao conversor D/A, antes que a próxima amostra seja adquirida.

Enquanto os microcontroladores ou microprocessadores comuns necessitam de vários ciclos de *clock* para executar uma instrução mais complexa, os DSP's possuem conjuntos de instruções que, em situações especiais, podem executar um bloco de instruções em um ciclo de *clock*. Esta particularidade associada a outros recursos (acesso direto à memória, conversores A/D e D/A eficientes) torna possível a operação em tempo real. Fica

fácil perceber que um dos "gargalos" nesse sistema são os conversores A/D e D/A que devem ter alta taxa de amostragem (aquisição e processamento dos dados) para um resultado satisfatório.

Os primeiros processadores de sinais digitais surgiram na década de 60 e com custos elevados, o que limitava as aplicações à área militar e médica. Foi na década de 80 que os DSP's tomaram-se comerciais, logo determinando produtos como os telefones, modems, sintetizadores de áudio e outros.

Os DSP's possuem algumas características particulares projetadas para habilitar tarefas repetitivas de alta performance. Destas, a mais expressiva talvez seja a habilidade de realizar uma operação de multiplicação e acumulação (denominada normalmente de MAC, *Multiply and Accumulate*) em um único ciclo de instrução. Essa operação é muito utilizada em aplicações de processamento de sinais digitais em tempo real.

Para alcançar uma operação MAC em único ciclo de *clock*, os processadores de sinais digitais precisam integrar tanto uma unidade multiplicadora quanto uma acumuladora em seu barramento de dados principal. Esta é a diferença principal, em termos de *hardware*, entre os microcontroladores e microprocessadores, pois ambos não possuem essas unidades, como mostrado anteriormente. Suas operações de multiplicação são realizadas por somas e deslocamentos sucessivos.

Uma característica interessante dos DSP's é sua capacidade de realocar o espaço não utilizado da memória de programa para uma extensão da memória de dados. Uma vez que o *hardware* estiver em execução, o programa contido na memória de programa não será alterado, possuindo tamanho fixo, possibilitando facilmente determinar o espaço não utilizado e alocá-lo para outra função.

Atualmente os DSP's são empregados em uma grande variedade de produtos eletrônicos, mas dominam algumas aplicações mais comuns, como:

- Nas telecomunicações (filtros, compressão, multiplexação e cancelamento de eco).
- No processamento de áudio (gravação em estúdio, sintetizadores, *mixers*, filtros e reconhecimento de voz).
- No processamento de imagens (principalmente na área médica).

- Na instrumentação e controle (precisão das medidas e controle industrial).

Os controladores de sinais digitais (DSC) são processadores de sinais digitais (DSP), porém esta sigla se refere à aplicação (o processamento de sinais digitais), já a denominação controladores de sinais digitais (DSC) refere-se ao *hardware*. São denominados controladores de sinais digitais, porque em sua pastilha há outros periféricos além do processador, mas possuem as inovações dos DSPs.

Os controladores de sinais dsPIC da Microchip são dispositivos que absorvem as principais características do mundo dos microcontroladores (o baixo custo e a variedade de periféricos internos), unindo com a arquitetura voltada para o processamento em tempo real dos DSP's, assim, criando uma linha de dispositivos intermediários. Possuem encapsulamentos pequenos, como o formato PDIP, utilizado em matrizes de contato, de 18 pinos, o que não é comumente visto nos DSP's.

São designados para aplicações de áudio e controle de movimentos (motores, encoders, etc.), de forma geral, para as aplicações que os microcontroladores não são capazes de atender. Eles possuem o melhor dos dois mundos dos microcontroladores (tamanho, custo e periféricos internos) e DSP's (velocidade de processamento, MAC).

Após esse detalhamento da unidade central de processamento de um sistema embarcado, sabe-se que esta pode ser considerada uma caixa-preta que realiza o controle de sinais de entrada, saída ou ambos. Esses sinais podem ser de diversas tensões diferentes, pois dependem das especificações da unidade de controle. Geralmente estão agrupados em categorias devido à temperatura do local de trabalho e suas tensões de entrada e saída são: espacial, militar e de uso geral. Nesta última categoria, as tensões de entrada e saída são em seu geral de 3,3 V ou 5 V.

O item a ser controlado pode não trabalhar com a tensão de entrada ou saída da unidade de controle, então se utiliza uma interface para realizar a conversação das duas partes.

2.15.2 Processamento em Tempo Real

O processamento em tempo real acontece num sistema cujo funcionamento se dá não apenas pela execução correta das operações realizadas pelo processador, mas também por um tempo ideal de processamento dessas operações. Isso quer dizer que, entre o processo de aquisição dos dados e a entrega dos resultados, vai existir um tempo máximo em que o processador deve manipular tais dados. O processamento desses dados deve ser efetuado antes da chegada de novos dados.

Quando se fala em tempo real, não quer dizer que a aquisição, processamento e entrega devem acontecer de forma instantânea. O tempo máximo de processamento vai depender do objetivo do sistema. Apesar disso, o processamento em tempo real geralmente acontece na ordem de milissegundos (ms) ou nanossegundos (ns). Tempo tão curto, que parece que o evento é instantâneo.

As tarefas em sistemas de tempo real são divididas entre tarefas com prazo: rígido (*hard deadline*) e flexível (*soft deadline*). Os significados dessas duas tarefas são discutíveis, pois se encontram diversas definições na literatura sobre o assunto. Uma delas fala que o prazo é rígido se uma falha no cumprimento do prazo for fatal ou catastrófica, como em sistemas de controle de voo ou gerenciamento de usinas nucleares. Outra definição para prazo rígido é no caso da ocorrência de falhas que levem o resultado do processamento se tornar inútil. Já para o prazo flexível, considera-se uma falha um erro aceitável de processamento. Esses erros são medidos como qualidade do serviço. Muitos erros correspondem a uma baixa qualidade de serviço.

Esse tipo de processamento geralmente exige grande capacidade computacional, devido à necessidade da resolução de equações. Os microcontroladores têm dificuldades para executar tal processamento. Assim, essa tarefa fica direcionada aos DSP's, DSC's e processadores de alto desempenho. É possível ainda alcançar esse tipo de processamento usando técnicas de associação de processadores menos velozes, é o chamado processamento distribuído (comumente realizado por uma associação de microcomputadores). É um agrupamento de processadores, que tem um principal

(um chefe), que distribui o processamento entre os demais. Realizando um processamento paralelo de funções, diminuindo o tempo de resolução de operações complexas. Não sendo uma solução tão trivial, não é muito adotada, apenas em casos específicos.

2.15.3 Conversão A/D e D/A

De um modo geral, os sinais encontrados no mundo real são contínuos (ou analógicos, pois variam no tempo de forma contínua), como, por exemplo: a intensidade luminosa de um ambiente que se modifica com a distância, a aceleração de um carro de corrida, etc.

Os sinais manipulados por computadores e sistemas embarcados são os digitais, por exemplo: um computador processando dados lidos de um *drive* de CD-ROM, os dados enviados para a tela do monitor, etc.

A conversão analógico-digital (A/D) é o processo que possibilita a representação dos sinais analógicos no mundo digital. Desta forma é possível utilizar os dados extraídos do mundo real para cálculos ou operar seus valores.

Em geral, o conversor A/D está presente internamente nos processadores e controladores de sinais digitais e alguns microcontroladores, mas também existem circuitos integrados dedicados a este fim.

Basicamente é um bloco que apresenta portas de entrada e saída. A entrada recebe sinais elétricos de forma contínua e possui uma faixa de tensão de entrada máxima. Nos microcontroladores que possuem um conversor A/D e operam na faixa de 5 V, geralmente a faixa de tensão, aceita sinais elétricos entre [-5 V a +5 V].

Na saída o sinal é amostrado, a cada intervalo de tempo fixo (determinado pela frequência de amostragem) é disponibilizado certo valor que representa o sinal original naquele momento (quantização). Estas características estão relacionadas à precisão do conversor.

Para ilustrar essa situação, apresenta-se a figura 29. Imagine que se

deseja mostrar a temperatura de um forno num *display* de cristal líquido (LCD). Para isso seriam necessários alguns componentes eletrônicos. Os mais expressivos são: um transdutor (sensor de temperatura), um *display* de cristal líquido (LCD), um processador digital e um conversor analógico digital.

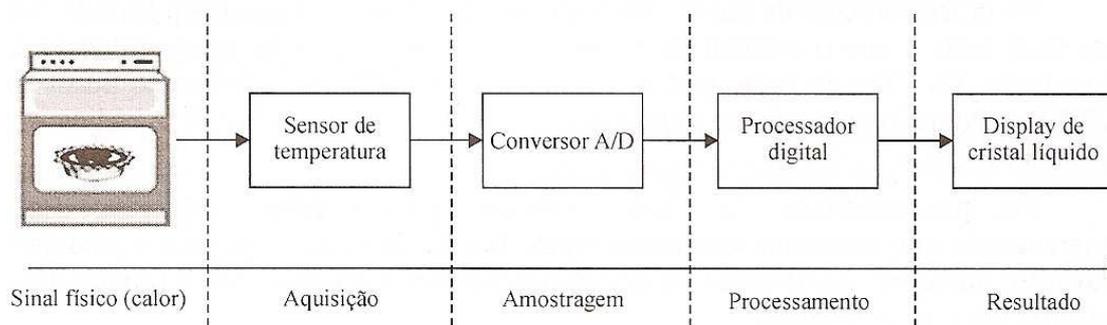


Figura 29. Diagrama de blocos de uma conversão A/D
(Fonte: Oliveira, 2006)

A temperatura é um sinal analógico. O sensor de temperatura converte a temperatura em um sinal de impulsos elétricos analógicos. O conversor A/D recebe esse sinal e o transforma em sinal digital, por meio da amostragem, entregando-o ao processador. Este, por sua vez, manipula esses dados e envia-os para o *display*, mostrando em graus a temperatura do forno. Ainda nesta figura é possível verificar três importantes etapas: a aquisição, a amostragem e o processamento. A figura 30 mostra a representação daquele sinal analógico (contínuo) e seu equivalente na forma digital (discreto).

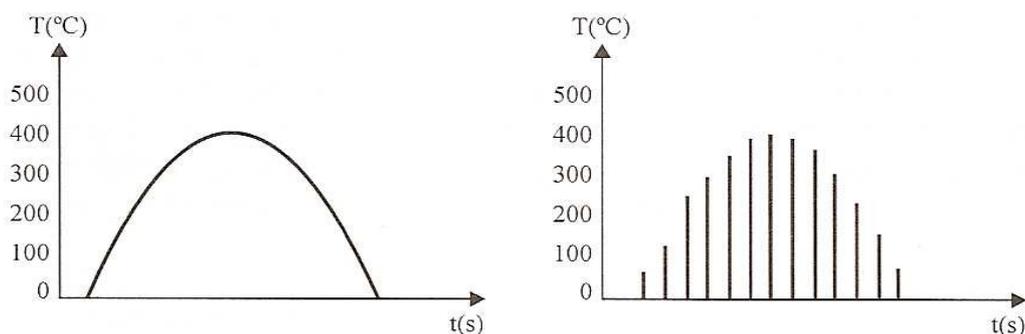


Figura 30. Representação do sinal analógico e digital
(Fonte: Oliveira, 2006)

A informação digital é diferente da sua original contínua em dois aspectos

fundamentais:

- É amostrada porque é baseada em amostragens, ou seja, são realizadas leituras em um intervalo fixo de tempo no sinal contínuo.
- É quantizada porque é atribuído um valor proporcional a cada amostra. Explorando um pouco mais o caso do forno, a figura 31 detalha um pouco mais as três etapas mais importantes do processo, já citadas.

No diagrama de blocos da figura 31, o sinal analógico é capturado pelo transdutor (sensor), em seguida passa por um filtro, denominado de anti-alias, a fim de diminuir os ruídos. A chave representa a frequência de amostragem do conversor A/D, sincronizado com um *clock* (relógio). O conversor A/D faz a conversão no sinal entregando ao processador o sinal digitalizado.

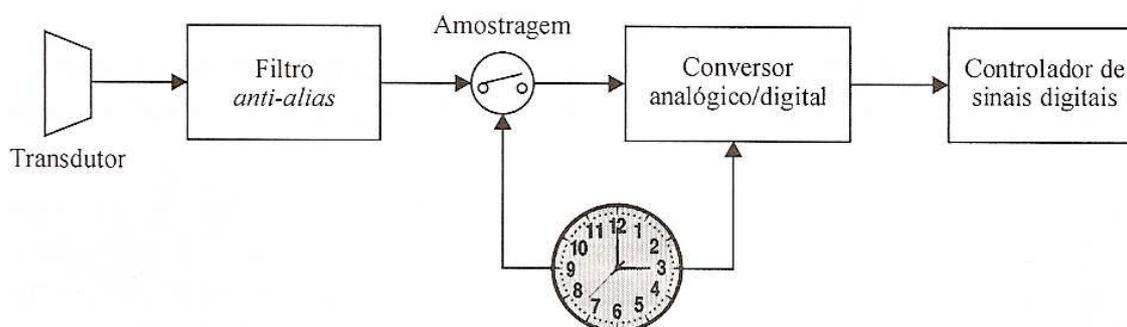


Figura 31. Diagrama de blocos da conversão A/D
(Fonte: Oliveira, 2006)

A frequência de amostragem é o número de amostras capturadas em um segundo. Esta frequência é dada em Hertz (Hz) e é considerada adequada quando se pode reconstruir o sinal analógico razoável a partir das amostras obtidas na conversão.

A taxa de conversão ou frequência de amostragem é de suma importância para o processamento de sinais reais. Para obter uma taxa de amostragem adequada, existe o teorema da amostragem. Ele indica que um sinal contínuo $x(t)$ pode ser amostrado adequadamente se tiver banda limitada, ou seja, seu espectro de frequência não pode conter frequências acima de um valor máximo

($F_{\text{máx}}$ - frequência máxima). Além disso, outro ponto importante é que a taxa de amostragem (F_a - frequência de amostragem) deve ser escolhida para ser, no mínimo, duas vezes maior que a frequência máxima ($F_{\text{máx}}$). Por exemplo, para representar um sinal de áudio com frequências até 10 kHz, o conversor A/D deve amostrar esse sinal utilizando uma frequência de amostragem (F_a) de no mínimo 20 kHz.

Para melhor entendimento, a figura 32 apresenta o funcionamento de um conversor A/D de 4 bits.

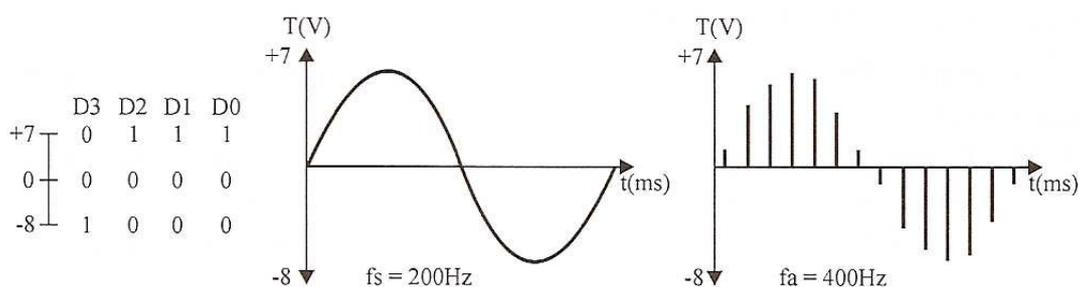


Figura 32. Conversor A/D de 4 bits
(Fonte: Oliveira, 2006)

Com 4 bits o máximo representável é o número 16. Isso quer dizer que tem-se uma faixa de [0 a 15] (não sinalizado) ou [+7 a -8] (sinalizado). Nesse conversor fictício, tem-se uma variação a cada 1 volt. A Figura 34 mostra um sinal de áudio de 200 Hz variando de [+7 a -8] volts, que será capturado por um microfone. Conforme o teorema da amostragem, seria necessária uma frequência de amostragem de 400 Hz.

Lembrando que, se o sinal de áudio possuísse amplitude maior que a faixa representável do conversor A/D [+7 V e -8 V], então não seria possível converter tal sinal.

Existe também o conversor digital-analógico (D/A), que possui todas as características do conversor A/D, os quais diferem apenas porque o D/A recebe um sinal digital e transforma em analógico. Por exemplo, em uma aplicação de áudio, um microfone captura o áudio e o envia a um conversor A/D, que entrega o sinal amostrado e quantizado a um processador digital. Este último efetua diversas operações com o sinal de áudio. Só então o processador envia ao

conversor D/A, para remontar o sinal analógico a partir do sinal digital, para ser reproduzido em um alto-falante.

Um exemplo de circuito integrado comercial dedicado para a conversão A/D de 16 *bits* é o ADS1100, e para a conversão D/A de 16 *bits* é o DAC1221.

2.15.4 Segurador de Ordem Zero (ZOH)

As variáveis a serem manipuladas digitalmente precisam ser amostradas e convertidas em valores numéricos, uma vez que estas grandezas são de características analógicas. As amostras são atualizadas a cada intervalo de amostragem com a chegada de nova amostra. Dessa forma, precisa-se de dispositivos que possuam a característica de amostrar e segurar o sinal analógico para que não ocorram erros no momento da conversão do sinal analógico em digital por intermédio do conversor A/D. Esse dispositivo chama-se amostrador e retentor de dados (S/H - *sample-and-hold*). Basicamente eles têm a função de coletar as amostras (*sample*) e mantê-las constante (*hold*) durante o intervalo de amostragem e também são utilizados na saída de conversores D/A.

Um dos dispositivos de reconstituição de sinais mais utilizados em controle digital é o ZOH (*zero order hold*), assim chamado devido ao fato de sua saída ser uma interpolação de ordem zero das amostras de entrada. Um dispositivo de S/H pode ser representado por um amostrador ideal seguido de um ZOH.

2.15.5 Efeito da Amostragem – Aliasing

Normalmente filtros analógicos passa-baixa são colocados antes da amostragem do sinal analógico pelo conversor A/D, sua função é reduzir as componentes de altas frequências no sinal a fim de prevenir o fenômeno chamado de *aliasing*. Esse efeito ocorre em sistemas amostrados, quando um sinal de alta frequência assume a identidade de um sinal de frequência menor.

Para evitar este inconveniente que ocasiona erros de interpretação do sinal amostrado, deve-se respeitar o teorema da amostragem de *Shannon*, cujo

enunciado diz que é possível reconstruir teoricamente um sinal a partir de suas amostras se a frequência de amostragem for maior que 2 vezes a componente de maior frequência contida no sinal amostrado.

Em projetos de controle digital, normalmente colocam-se filtros passa-baixa, chamados filtros *antialiasing*, cuja frequência de corte localiza-se na metade da frequência de amostragem do conversor A/D. Desta forma evita-se que qualquer componente de frequência elevada seja amostrada e passe a representar uma outra componente de frequência diferente (*aliasing*), podendo prejudicar e interferir na dinâmica das malhas de controle.

2.15.6 Ponto Fixo e Ponto Flutuante

Uma das primeiras decisões a ser feita em uma aplicação é sobre quando utilizar um processador de ponto fixo ou flutuante. Em geral arquiteturas em ponto flutuante são mais caras que as de ponto fixo, este seria um dos argumentos a favor dos pontos fixos. Outro argumento bastante utilizado refere-se ao fato de que o formato em inteiro é ideal em aplicações reais onde se utilizam conversores A/D e D/A, pois estes normalmente convertem grandezas analógicas em números de ponto fixo e vice-versa.

Entretanto o ponto flutuante permite representar adequadamente escalas com grandes variações, ou seja, permite uma faixa dinâmica maior e ainda melhor precisão por apresentar um número de *bits* mais elevado (em precisão simples na norma IEEE-754 define uma palavra de 32 *bits*). A principal característica na representação em ponto flutuante é que os números não são uniformemente espaçados, no formato mais comum (ANSI/IEEE 754-1985) representam-se os números compreendidos no intervalo de $\pm 3,4 \times 10^{38}$ à $\pm 1,2 \times 10^{-38}$. Desta forma, entre números grandes o incremento pode ser maior, mas na representação entre números muito pequenos, empregam-se espaçamentos pequenos.

Esta flexibilidade em representar números pequenos e grandes é a principal vantagem da utilização de números em ponto flutuante. Sendo assim, a aritmética em ponto flutuante traz como benefício principal a facilidade de operação e manipulação em aplicações que requeiram manuseio com diferentes

magnitudes numéricas, por exemplo, em situações que utilizam excessivas operações de produtos e acumulações, como filtros e controladores digitais. Se utilizar aritmética em ponto fixo, o projetista deverá encarregar-se de se certificar de que a cada operação os valores envolvidos estejam devidamente representados e também deve ser considerada em cada operação a possibilidade de ocorrerem *overflow/underflow* e os erros de arredondamento. Cabe salientar que os problemas ocasionados pelo comprimento finito da palavra utilizada (16, 32 *bits*...) para se representar os valores numéricos ocorrem em ambas as operações aritméticas, tanto nas de ponto fixo como nas de ponto flutuante.

2.15.7 Processamento Digital de Sinais

O processamento digital de sinais manipula um sinal digitalizado vindo de um sistema contínuo (analógico) que foi amostrado e quantizado. Após a conversão A/D, um sinal contínuo passa a ser representado por um conjunto de valores numéricos discretos. Sendo assim, é mais fácil e conveniente realizar manipulações e transformações matemáticas com esse conjunto de números, do que se eles estivessem no domínio analógico.

Nesse tipo de processamento, observam-se algumas vantagens como a integrabilidade, flexibilidade, repetibilidade, precisão e o processamento de alta complexidade. Como desvantagens pode-se citar a necessidade de utilizar conversor analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A), filtros *antialiasing*, limitação em frequência e ruídos de quantização.

Para que seja processado algum sinal digital, é necessário um sinal físico. Também chamado de sinal real, pode-se citar o som, a intensidade luminosa, a temperatura, a pressão atmosférica, etc. Esses sinais são capturados por um transdutor que converte tal sinal físico em sinal elétrico. Desta forma pode-se dividir o processamento digital de sinais nas seguintes etapas: aquisição, amostragem e processamento.

Para entender a diferença entre os sinais analógicos e digitais, analisa-se a figura 33. Na qual se pode perceber um gráfico da tensão (V) pelo tempo (t).

Isso representa uma tensão variando no tempo, como, por exemplo, a energia que sai da fonte de um computador. Neste gráfico tem-se a função contínua V da variável contínua t , então tem-se um sinal analógico $V(t)$.

Representando o mesmo sinal de forma digital, tem-se uma função discreta V_k da variável discreta amostrada t_k sendo k um inteiro ($V_k = V(t_k)$) e representa a iteração durante o processo de amostragem. A figura 33 mostra o sinal digitalizado.

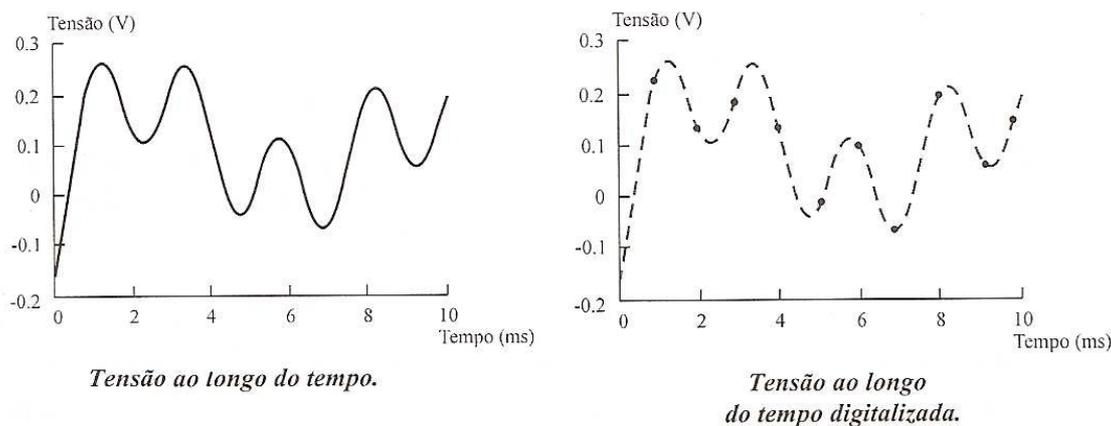


Figura 33. Sinal digitalizado
(Fonte: Oliveira, 2006)

Com o processamento digital de sinais é possível realizar várias ações, como a remoção da média, ampliação do sinal, retificação, normalização no tempo ou na amplitude, na suavização, na derivação e na integração. A figura 34 ilustra a retificação e amplificação de um sinal de áudio. Estes são os chamados de processamento no tempo. Existe ainda o processamento na frequência e um exemplo típico são as filtragens digitais, que podem ser algoritmos simples até alguns muito complexos.

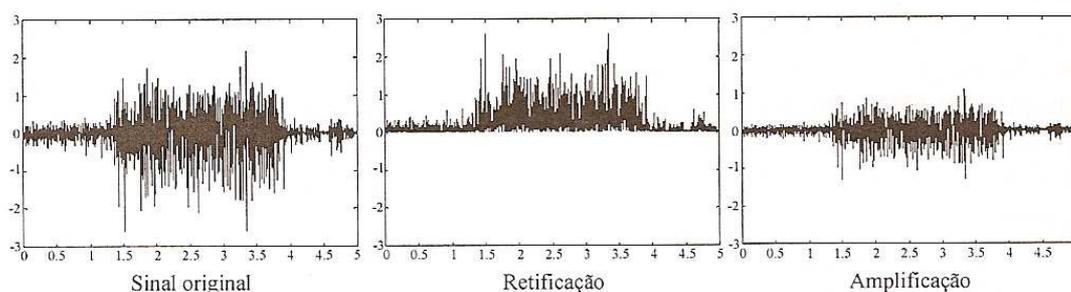


Figura 34. Retificação e amplificação de um sinal de áudio
(Fonte: Oliveira, 2006)

2.15.8 Planejamento e Projeto de um *Software*

A engenharia de *software* é uma área do conhecimento que apresenta técnicas de desenvolvimento de *software* de uma forma documentada e organizada para suprir todas as suas necessidades, e ter uma maneira sistemática para o desenvolvimento, com o intuito de manter a produção dentro dos prazos e custos estimados.

A engenharia de *software* tem como finalidade utilizar um conjunto de métodos, técnicas e ferramentas para analisar, projetar e gerenciar o desenvolvimento e a manutenção do *software*.

Nota-se que o desenvolvimento de um *software* não é apenas programar desordenadamente, mas desenvolver uma solução minimizando tempo, custo e facilitando as manutenções.

A engenharia de *software* tem como princípios no desenvolvimento de um *software*:

- Abstração: levar em consideração os aspectos mais relevantes, ignorando os demais.
- Decomposição: tem como objetivo dividir o problema em vários problemas menores, para facilitar a solução, para controlar a complexidade do *software*.
- Flexibilização: fornecer ao *software* a possibilidade de ser alterado sem grandes transtornos no desenvolvimento.

- Formalidade: organizar o desenvolvimento de forma padronizada, seguindo efetivamente o protocolo, para reduzir as inconsistências.
- Generalização: solucionar um problema de maneira genérica para reutilizar em situações semelhantes, minimizando o custo.

Para ilustrar o desenvolvimento de um *software*, ainda existem os ciclos de vida de *software*, uma forma de planejar para ter um controle sobre o desenvolvimento e as etapas de produção.

O modelo mais simples é o clássico (também chamado de cascata ou linear) e é o modelo de desenvolvimento mais difundido.

Ele é sequencial e prevê o retorno à fase anterior, para consertar eventuais inconsistências em resultados produzidos por atividades anteriores. Seu funcionamento é descrito na figura 35.

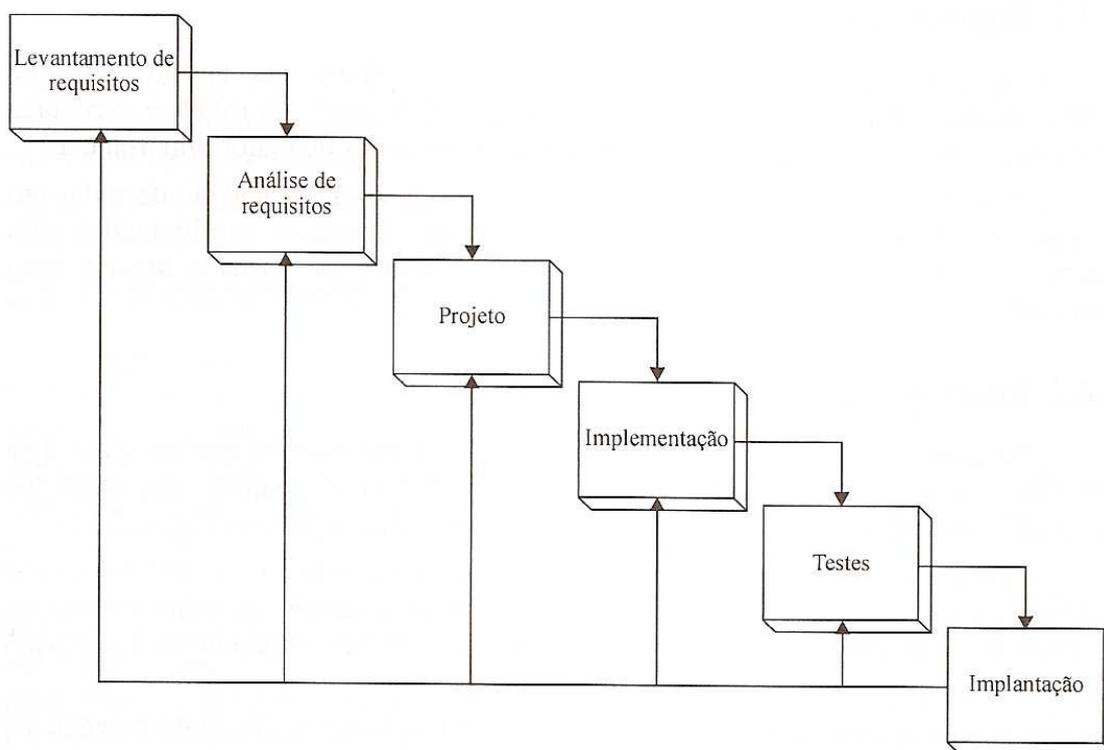


Figura 35. Ciclo de vida clássico de *software*
(Fonte: Oliveira, 2006)

2.15.9 Linguagem de Programação C

Linguagem de programação C a qual tem se tornado cada dia mais popular, devido à sua versatilidade e ao seu poder. Uma das grandes vantagens do C é que ele possui tanto características de “alto nível” quanto de “baixo nível”.

A linguagem de programação C foi desenvolvida no início dos anos 70 nos Laboratórios AT&T Bell, nos Estados Unidos. A motivação para que o autor de C, Dennis Ritchie, criasse uma nova linguagem de programação foi o desenvolvimento do sistema operacional Unix. C é uma ferramenta tão básica que praticamente todas as ferramentas suportadas por Unix e o próprio sistema operacional foram desenvolvidas em C.

C acompanhou o ritmo da distribuição do sistema operacional Unix, que foi amplamente divulgado e livremente distribuído na década de 70. Apesar de haver compiladores para linguagens mais “tradicionais” na distribuição Unix, aos poucos C foi ganhando simpatizantes e adeptos. Atualmente, não há dúvidas de que C é uma das linguagens de programação de maior aceitação para uma ampla classe de aplicações.

Um dos grandes atrativos da linguagem C é o balanço atingido entre características próximas da arquitetura de computadores e características de linguagens de programação com alto nível de abstração. O ascendente mais remoto de C, Algol 60, desenvolvida por um comitê internacional, foi uma linguagem que buscava um alto grau de abstração, com estruturas modulares e sintaxe regular. Por Algol ser “abstrata demais”, variantes surgiram que buscavam aproximar aquela linguagem um pouco mais da máquina, tais como CPL (*Combined Programming Language*), desenvolvida na Inglaterra.

Esta linguagem era ainda muito complexa, o que dificultava seu aprendizado e a implementação de bons compiladores. BCPL (*Basic CPL*) buscava capturar apenas as características principais de CPL, e B (desenvolvida por Ken Thompson nos Laboratórios Bell, em 1970) levava este objetivo ainda mais adiante. Entretanto, estas linguagens ficaram tão “básicas” que tinham pouca aplicação direta. Ritchie reincorporou algumas características de alto nível à B, tais como suporte a tipos de dados, para criar a linguagem C.

A simplicidade de C não restringe, no entanto, a potencialidade de suas aplicações. Blocos desempenhando tarefas muito complexas podem ser criados a partir da combinação de blocos elementares, e este mecanismo de combinação de partes pode se estender por diversos níveis. Esta habilidade de construir aplicações complexas a partir de elementos simples é um dos principais atrativos da linguagem.

O sucesso de C foi tão grande que diversas implementações de compiladores surgiram, sendo que nem todos apresentavam o mesmo comportamento em pontos específicos, devido a características distintas arquiteturas de computadores ou a “extensões” que se incorporavam à linguagem. Para compatibilizar o desenvolvimento de programas em C, o Instituto Norte-Americano de Padrões (ANSI) criou em 1983 um comitê com o objetivo de padronizar a linguagem. O resultado deste trabalho foi publicado em 1990, e foi prontamente adotado como padrão internacional. Além de padronizar aspectos básicos da linguagem, ANSI-C também define um conjunto de rotinas de suporte que, apesar de não ser parte integrante da linguagem, deve ser sempre fornecido pelo compilador.

2.16 Controle Automático

2.16.1 Introdução

O controle automático tem desempenhado um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência.

Além da extrema importância em sistemas de veículos espaciais, sistemas de direcionamento de mísseis, sistemas robóticos e similares, o controle automático tem se tornado de grande importância e parte integrante dos modernos processos industriais e de produção. Por exemplo, o controle automático é essencial no controle numérico de máquinas-ferramentas nas indústrias manufatureiras, no projeto de sistemas de piloto automático na indústria aeroespacial e no projeto de carros e caminhões na indústria automotiva. É essencial também em operações industriais, como o controle de pressão, de temperatura, de umidade, de viscosidade e de vazão nos processos industriais.

Como os avanços no controle automático, na teoria e na prática, vêm produzindo meios para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorar a produtividade, diminuir o trabalho árduo de várias rotinas de operações manuais repetitivas, entre outros.

2.16.2 Revisão Histórica

O primeiro trabalho significativo de controle automático foi o regulador centrífugo construído por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII. Outros trabalhos importantes nos primeiros estágios do desenvolvimento da teoria de controle se devem a Minorsky, Hazen e Nyquist, entre muitos outros. Em 1922, Minorsky trabalhou em controladores automáticos para pilotagem de embarcações e demonstrou como a estabilidade poderia ser determinada a partir de equações diferenciais que descrevem o sistema. Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento relativamente simples para a determinação da estabilidade de sistemas de malha fechada com base na resposta de malha aberta a excitações senoidais estacionárias. Em 1934, Hazen, que introduziu o termo *servomecanismos* para sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relé, capaz de acompanhar de perto uma variação de entrada.

Durante a década de 40, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido. Do final da década de 40 ao início da de 50, o método de lugar das raízes, graças a Evans, foi plenamente desenvolvido.

Os métodos de resposta em frequência e de lugar das raízes, os quais são a essência da teoria clássica de controle, conduziram a sistemas que são estáveis e satisfazem a um conjunto de condições de desempenho relativamente arbitrárias. Esses sistemas são, em geral, aceitáveis, mas não são ótimos no sentido estrito desse termo. Desde o final da década de 50, a ênfase nos problemas com projetos de controle foi deslocada do projeto de um dentre muitos sistemas que funcionam para o projeto de um sistema que seja ótimo em um aspecto relevante.

À medida que os sistemas modernos com muitas entradas e saídas se tornam mais e mais complexos, a descrição de um sistema de controle moderno requer um grande número de equações. A teoria clássica de controle, que trata somente de sistemas com uma entrada e uma saída, tornou-se insuficiente para sistemas com múltiplas entradas e saídas. A partir de 1960, uma vez que a disponibilidade dos computadores digitais possibilitou a análise de sistemas complexos diretamente no domínio do tempo, a teoria de controle moderno, com base na análise e na síntese de domínio de tempo com o emprego de variáveis de estado, foi desenvolvida para lidar com a crescente complexidade dos sistemas modernos e seus rigorosos requisitos relativos à precisão, à importância e ao custo em aplicações militares, espaciais e industriais.

Entre o período de 1960 e 1980, o controle ótimo de sistemas determinísticos e estocásticos, bem como o controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos, foram amplamente pesquisados. De 1980 em diante, os desenvolvimentos na teoria de controle moderno se voltaram para o controle robusto, o controle H_∞ e tópicos associados.

Agora que os computadores digitais se tornaram mais baratos e compactos, eles são utilizados como parte integrante dos sistemas de controle. Recentes aplicações da teoria de controle moderno incluem sistemas voltados a outras áreas, além da engenharia, como sistemas biológicos, de biomedicina, econômicos e socioeconômicos.

Definições, terminologia básica:

Variável controlada e variável manipulada: A variável *controlada* é a grandeza ou a condição que é medida e controlada. A variável *manipulada* é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Normalmente, a variável controlada é a saída do sistema. *Controlar* significa medir o valor da variável controlada do sistema e utilizar a variável manipulada ao sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado.

No estudo da engenharia de controle, é preciso definir termos adicionais que são necessários à descrição dos sistemas de controle.

Sistemas a controlar ou plantas: Um sistema a controlar pode ser parte de um equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação. Sistema a controlar é qualquer objeto físico a ser controlado (como um componente mecânico, um forno, um reator químico ou uma espaçonave).

Processos: O dicionário *Merriam-Webster* define um processo como uma operação natural de progresso contínuo ou um desenvolvimento caracterizado por uma série de modificações graduais que se sucedem umas às outras de modo relativamente estável, avançando em direção a determinado resultado ou objetivo; ou uma operação contínua progressiva, artificial ou voluntária, que consiste em uma série de ações ou movimentos controlados, sistematicamente destinados a atingir determinados fins ou resultados. Processo é toda operação a ser controlada. Entre os exemplos estão os processos químicos, econômicos e biológicos.

Sistemas: Um sistema é a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. A idéia de sistema não fica restrita apenas a algo físico. O conceito de sistema pode ser aplicado a fenômenos abstratos dinâmicos, como aqueles encontrados na economia. Dessa maneira, a palavra 'sistema' pode ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.

Distúrbios: Um distúrbio é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado dentro de um sistema, ele será chamado de distúrbio interno, enquanto um distúrbio externo é aquele gerado fora do sistema e que se comporta como um sinal de entrada no sistema.

Controle com realimentação: Controle com realimentação ou de malha fechada refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência e atua com base nessa diferença. Distúrbios conhecidos ou previsíveis podem sempre ser compensados no sistema.

3 METODOLOGIA

3.1 Aspectos Gerais

Na introdução do trabalho o diagrama de blocos do gerador de ozônio proposto foi detalhado, fornecendo uma idéia do equipamento proposto, conforme figura 36.

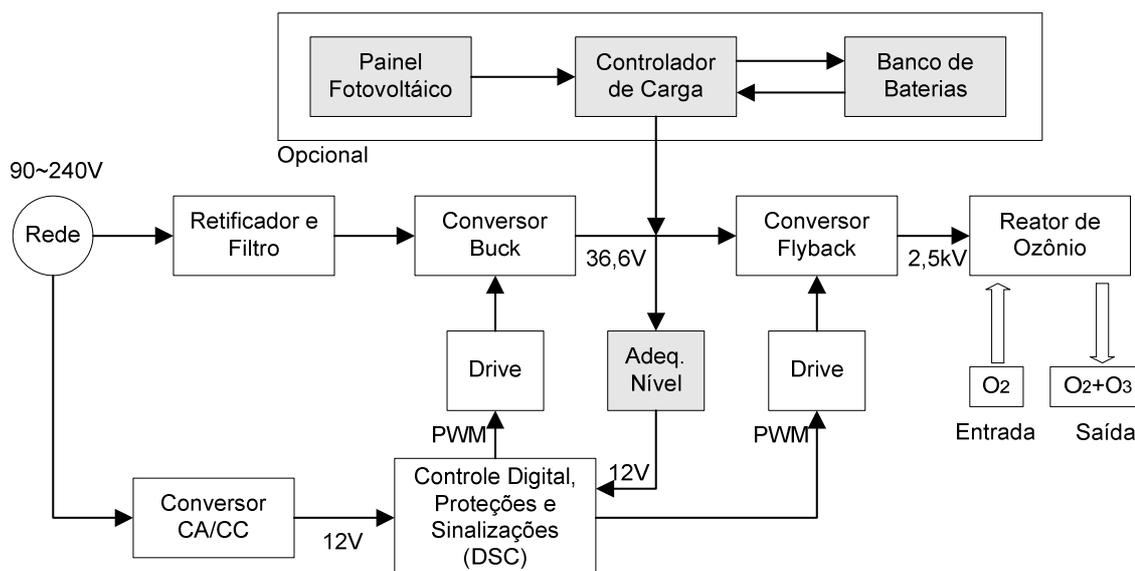


Figura 36. Diagrama de blocos do gerador de ozônio proposto

Para o desenvolvimento do gerador de ozônio foram utilizadas duas topologias de conversores CC/CC, um conversor *buck* e um conversor *flyback* estudados em eletrônica de potência, que são conversores CC/CC chaveados em alta frequência que utilizam semicondutores do tipo MOSFET (*MOS – Metal-Óxido-Semicondutor*) (*FET - Field Effect Transistor*) de modo intensificação ou enriquecimento, que tem a capacidade de gerar facilmente altos níveis de tensão elétrica. Para o controle deste conversor será adotada a modulação por largura de pulso (PWM) em malha fechada com controle proporcional + integral (PI), sinal este que pode ser gerado por circuitos integrados convencionais ou digitalmente por dispositivos programáveis como microcontroladores, dsp's e dsc's.

No processo de desenvolvimento deste sistema foram utilizados componentes mecânicos, componentes eletrônicos discretos, componentes

magnéticos como transformadores e indutores, placa de circuito impresso, percloreto de ferro para corrosão da placa, *softwares* para projetos de circuitos eletrônicos, desenvolvimento do programa para o DSC, instrumentos de medidas elétricas, entre outros.

Foi realizada uma análise da quantidade de ozônio produzida pelo gerador, onde apresenta-se uma relação experimental da produção de ozônio, em relação ao fluxo do gás de alimentação.

Como técnica de referência para a determinação da produção de ozônio, utiliza-se o método iodométrico (*APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. Whashington, 1989*).

Por ser um produto com uma vida média relativamente curta, com rápida degradação para formação de moléculas de oxigênio, não é possível armazenar o ozônio para posterior utilização, devendo ser gerado no próprio local de utilização, isto justifica a implementação de uma entrada para um sistema de energia solar, possibilitando assim, a utilização do equipamento para realização de tratamentos em regiões remotas, onde não existe energia elétrica disponível pela concessionária de energia, além disso, a utilização do *timer* garante um funcionamento automático entrando em operação nos dias e horários programados, durante o tempo necessário.

As figuras de 37 a 41 apresentam as fotos dos equipamentos desenvolvidos.



Figura 37. Detalhe interno do gerador com fonte convencional e 2 reatores



Figura 38. Detalhe interno do gerador com conversor *buck* com controle analógico

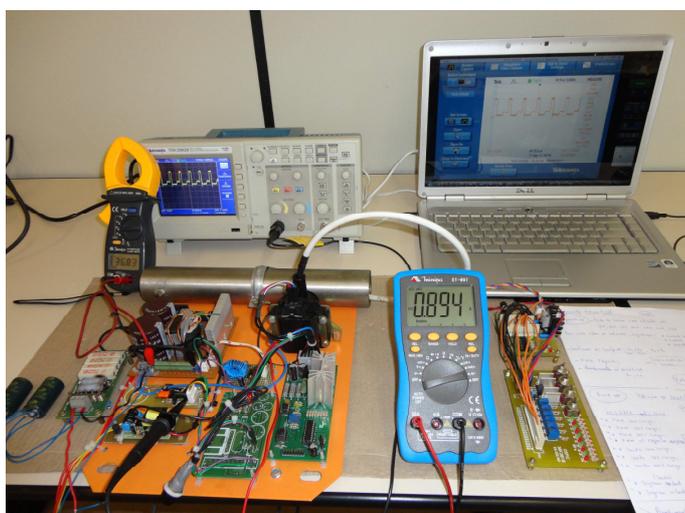


Figura 39. Gerador de ozônio com conversores *buck* e *flyback* com controle digital



Figura 40. Detalhe externo do gerador com instalação



Figura 41. Detalhe da injeção de ozônio pelo venturi

3.2 Modelagem do Reator

Nesta seção, será apresentada uma introdução dos principais parâmetros que interferem na geração da descarga corona no ar em uma configuração de eletrodos tipo cilindros coaxiais. Uma análise matemática mostrando a relação entre a tensão de ruptura e os raios dos cilindros, possibilita definir as dimensões do sistema de modo a se obter a máxima descarga corona sem causar a ruptura.

Foi visto no capítulo 2 que em espaçamentos com campo muito distorcido, o surgimento do primeiro *streamer* pode estabelecer uma atividade corona que estabiliza no espaçamento ou conduz diretamente a ruptura. Uma ou outra condição pode ocorrer, dependendo de alguns fatores tais como grau de distorção do campo, polaridade da tensão, pressão, umidade, taxa de fluxo e natureza do gás, barreira dielétrica e configuração geométrica dos eletrodos.

Como exemplo, a figura 42 compara as características de corona estabelecidas e ruptura em um espaçamento tipo ponta-plano positivo e negativo, medidas no ar em função da pressão do gás.

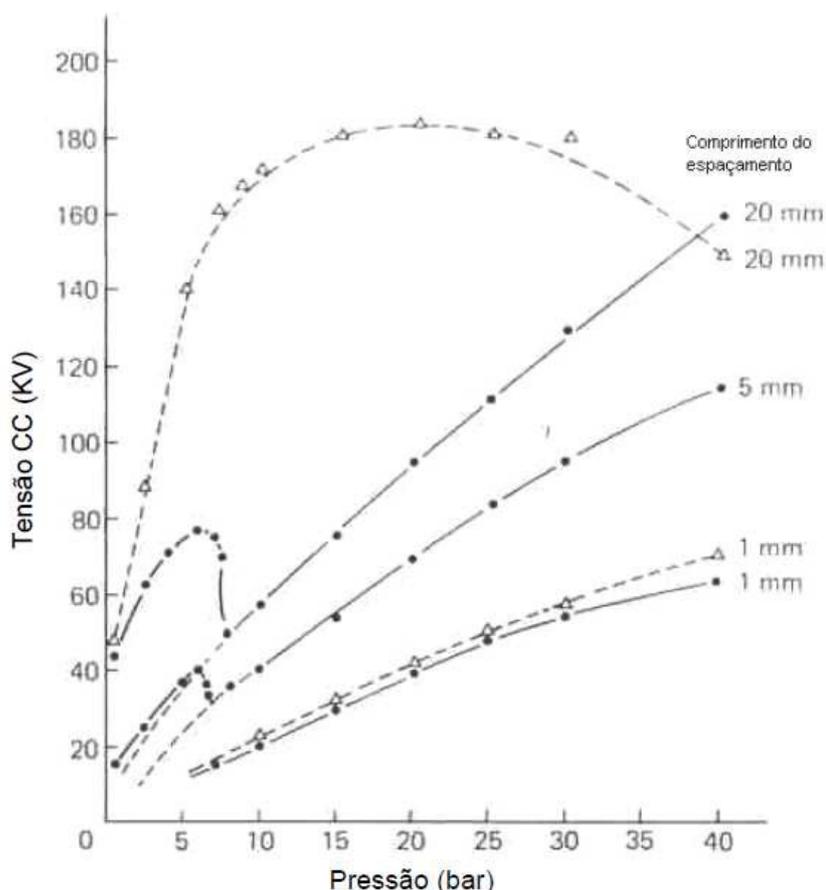


Figura 42. Características de corona estabelecido e ruptura em ponta-plano, no ar
 linha cheia: ponta positiva; linha tracejada: ponta negativa (raio de curvatura da
 ponta $r = 1$ mm); (Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984).

Para espaçamentos menores que 1 mm, as características de ruptura para ambas as polaridades quase se coincidem e não se verifica a formação de região com corona estabilizado. Para uma abertura um pouco maior e sob polaridade positiva, uma distinta região de corona estável se forma até próximo da pressão de 7 bar. Para espaçamentos maiores, a polaridade negativa apresenta uma região de corona estável bem maior que a polaridade positiva, prolongando-se a pressões mais elevadas (Armaroli, 2007).

Outro exemplo são os experimentos de Kuffel e Zaengl (1984) sobre a ruptura de corona para gases de diferentes naturezas, os quais mostraram que, para o caso particular do ar atmosférico e o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6), a ruptura no ar prolonga-se a pressões mais elevadas que no SF_6 devido à baixa mobilidade dos íons no SF_6 .

A seguir, uma análise matemática da configuração geométrica do arranjo experimental inicial será apresentada.

3.2.1 Configuração Geométrica do Arranjo Experimental

Uma prática geometria para campo não uniforme e que frequentemente é usada na construção de dispositivos de alta tensão é o arranjo cilindros coaxiais, também adotada neste trabalho. Escolhendo-se corretamente as dimensões radiais dos cilindros, é possível otimizar tal sistema para se obter uma descarga corona máxima, livre de ruptura (Kuffel; Zaengl,1984).

Considerando, inicialmente, um sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext} respectivamente, conforme a figura 43 onde o campo elétrico pode ser calculado a partir da tensão aplicada como mostrado a seguir:

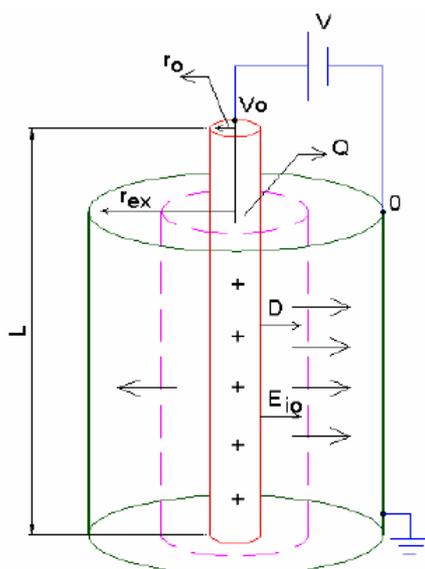


Figura 43. Sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext} (Fonte: Armaroli, 2007)

Onde, No SI:

- V é a tensão da fonte (V)
- V_0 a tensão aplicada (V)
- E é o campo elétrico (N/C)
- Q é a carga (C)
- r_0 é o raio do cilindro interno (m)
- r_{ext} o raio do cilindro externo (m)
- L é o comprimento do cilindro interno (m).

Inicialmente, tem-se que o campo elétrico em função da tensão aplicada é dado pela seguinte expressão:

$$V_0 = -\int \bar{E}.d\bar{l} \quad (3.1)$$

e por meio da Lei de Gauss:

$$\oint \bar{E}.d\bar{l} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

Onde ϵ_0 é a permissividade elétrica. Integrando, tem-se:

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \epsilon_0} \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) em (3.1) e integrando novamente, tem-se:

$$Q = \frac{V_0 2\pi l \epsilon_0}{\ln \frac{r_0}{r_{ext}}} \quad (3.4)$$

Substituindo (3.4) em (3.3) obtém-se:

$$E(r) = \frac{V_0 2\pi l \epsilon_0}{2\pi r l \epsilon_0 \ln \frac{r_0}{r_{ext}}} \quad (3.5)$$

Simplificando o termo do lado direito da equação (3.5) obtém-se:

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln \frac{r_{ext}}{r_0}} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) mostra a intensidade do campo no espaço intereletrodo para uma distância radial r onde V_0 é a tensão aplicada.

Quando o nível de tensão no cilindro de diâmetro menor atingir o nível de ruptura (nomeado de E_b) ocorrerá na sequência uma descarga corona estabilizada ou a ruptura completa (Kuffel; Zaengl, 1984).

Então, na equação (3.6), fazendo a tensão aplicada ser igual a V_b tem-se:

$$V_b = E_b r_0 \ln \frac{r_{ext}}{r_0} \quad (3.7)$$

Onde V_b é a tensão aplicada para obter a descarga corona estabilizada ou ruptura completa.

O valor de E_b é obtido utilizando-se a figura 44 a seguir, cujas curvas foram geradas por diversos pesquisadores. Este gráfico compara os valores calculados (E_b/δ), plotados em função do produto (δr) usando a equação (3.8), a equação de Zaengl e Nyffenegger (1974 apud Kuffel; Zaengl, 1984, p.366) e a equação de Schumann (1923 apud Kuffel; Zaengl, 1984, p.359). A expressão empírica desenvolvida por Peek (1920 apud Kuffel; Zaengl, 1984, p.366) para cálculo do campo crítico é dado por:

$$\frac{E_b}{\delta} = 31,53 + \frac{9,63}{\sqrt{\delta r}} \quad (3.8)$$

Onde E_b é a intensidade do campo para se obter uma descarga corona estabilizada para diferentes diâmetros de condutor interno e densidade relativa do ar. E é dado em kV/cm, r em cm e δ é a densidade relativa.

Como pode-se observar, o campo elétrico depende da densidade relativa do gás e do raio interno. A densidade, por sua vez, está relacionada com a pressão e a temperatura conforme a equação (3.9) a seguir:

$$\delta = 0,386 \frac{P}{(273 + t)} \quad (3.9)$$

onde p é a pressão e t a temperatura. Para fins práticos, as características de ruptura foram obtidas nas condições atmosféricas padrão onde $p = 760$ Torr (= 1 bar) e $t = 20^\circ\text{C}$ (= 293 K).

Então, conhecendo-se os valores da pressão e temperatura para condições ambientais, tem-se a densidade relativa. Para um dado valor de r , obtém-se o campo crítico dado pela figura 44.

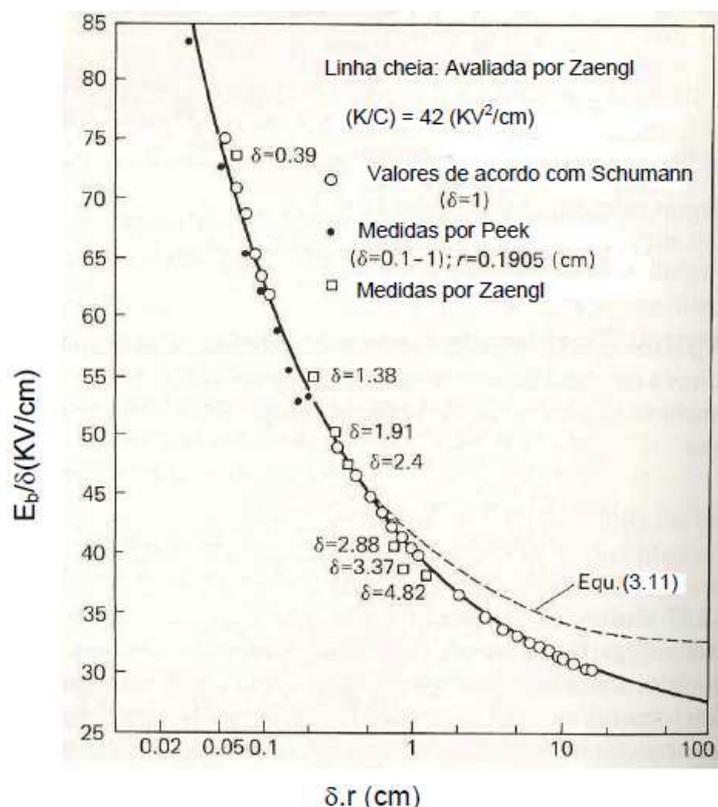


Figura 44. Variação da intensidade do campo para corona estabelecido (E_c/δ) com δr para geometria cilíndrica coaxial no ar (Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984)

Finalmente, diferenciando a equação (3.7), obtém-se a máxima tensão de corona inicial ou ruptura completa para o sistema, em relação a r_0 . Abandonando a dependência do campo, tanto em relação a densidade do gás como do raio do condutor interno, pode-se assumir E_b como sendo um valor constante. Então, mantendo r_{ext} constante, essa condição permite fornecer o ponto no sistema para a máxima tensão (Kuffel; Zaengl, 1984) conforme abaixo:

$$\frac{dV_b}{dr_0} = E_b \left(\ln \frac{r_{ext}}{r_0} - 1 \right) = 0 \Rightarrow \frac{r_{ext}}{r_0} = e \quad (3.10)$$

Substituindo a equação (3.10) em (3.7) tem-se:

$$(V_b)_{m\acute{a}x} = E_b r_0 \quad (3.11)$$

A figura 45 exibe a relação funcional entre a tensão de ruptura e o raio do cilindro interno, para um cilindro externo de raio fixo r_{ext} . A curva tracejada indica, quantitativamente, a tensão de início da descarga corona e a curva sólida a tensão de ruptura. O máximo valor da tensão de ruptura também  mostrado e ela ocorre quando os raios dos cilindros externo e interno, satisfazem a relao da equao (3.10).

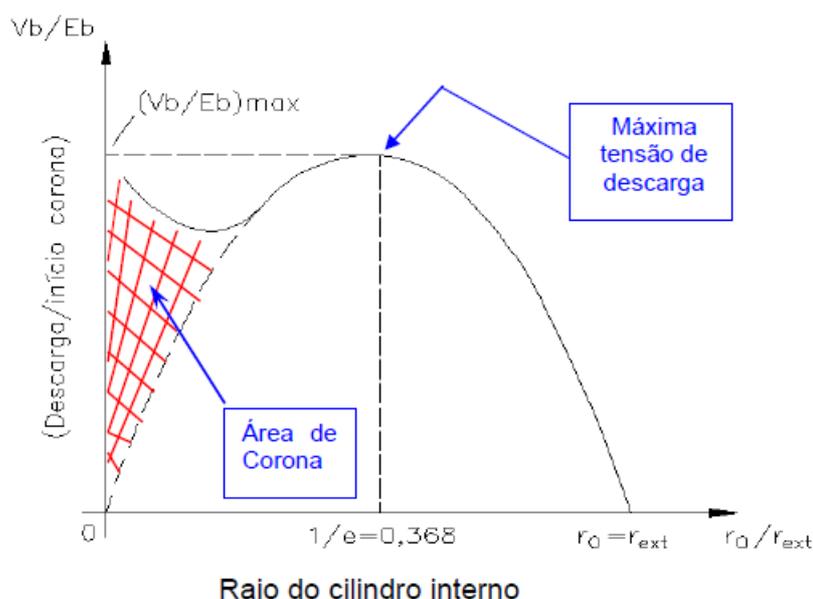


Figura 45. Relao entre tensão de ruptura e raio interno em um sistema de cilindro coaxial
(Fonte: Kuffel; Zaengl, 1984, Armaroli, 2007)

A curva com início tracejado  a teórica só que, na prática, ocorre a curva com linha cheia. Para a curva teórica, a relao entre o raio interno e externo  ótimo em $(1/e)$, ou seja, tem-se a máxima tensão para ocorrer uma descarga. Porém, isto não está relacionado com a descarga corona, pois não se garante que na área sob o ponto $(1/e)$ ocorre esta descarga. De acordo com a figura 45,

só haverá descarga corona na área hachurada, ou seja, na região compreendida entre a linha tracejada e a linha cheia.

Assim, na configuração cilindros coaxiais, utilizando-se um fio fino como cilindro interno e, aplicando uma tensão de valor baixo, já se obtém descarga corona. A medida que se aumenta mais a tensão, a região de ionização corona vai crescendo até o nível que a tensão atinge a curva sólida e ocorre a descarga.

Então, de acordo com a figura 46, a descarga corona altera o raio do cilindro interno criando um eletrodo virtual ionizado, ou seja, aumentando-se a tensão aplicada, aumenta a região de ionização (plasma corona) até o ponto que ocorre a descarga completa.

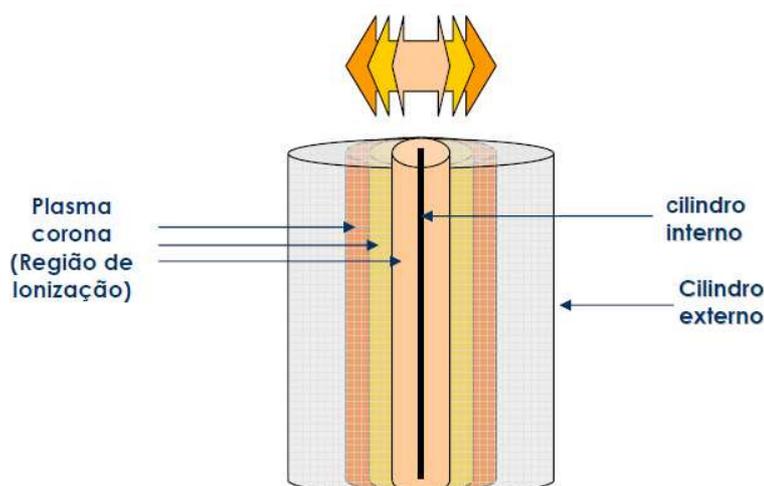


Figura 46. Plasma corona crescendo com o aumento da tensão
(Fonte: Armaroli, 2007)

Portanto, a configuração ótima deve ser definida em termos de segurança para não romper, e não no ponto de máxima tensão para descarga.

As soluções apresentadas neste estudo foram baseadas nas equações de Laplace onde não há influência da carga espacial. Caso contrário, o estudo exigiria soluções mais complexas, por meio das equações de Poisson.

O reator projetado e validado na prática, possui as seguintes dimensões:

Diâmetro do cilindro externo: 5 cm.

Diâmetro do cilindro interno: 4,5 cm.

Comprimento dos cilindros: 30 cm.

3.3 Modelagem Conversão *Buck*

3.3.1 Conversão *Buck*

Os conversores do tipo *buck* são os mais utilizados atualmente, devido as boas características obtidas. Seu funcionamento baseia-se no armazenamento de energia em um indutor sob forma de corrente (a mesma corrente que circula pela carga) e com tensão de saída dependendo da amplitude e largura dos pulsos PWM aplicados. O circuito de potência do conversor *buck* é apresentado na figura 47.

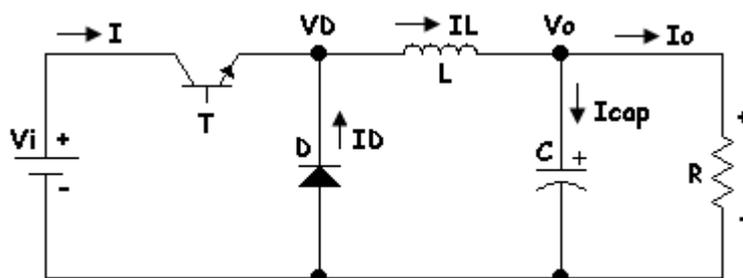


Figura 47. Circuito elétrico do conversor tipo *buck*

A figura 48 mostra as principais formas de onda para este conversor.

As correntes de magnetização (I_{mg}) e desmagnetização (I_{dmg}) possuem variações lineares (rampa), devido à tensão constante durante os períodos T_{on} e T_{off} .

Supondo funcionamento em regime permanente (carga de valor fixo), o circuito funciona da seguinte maneira:

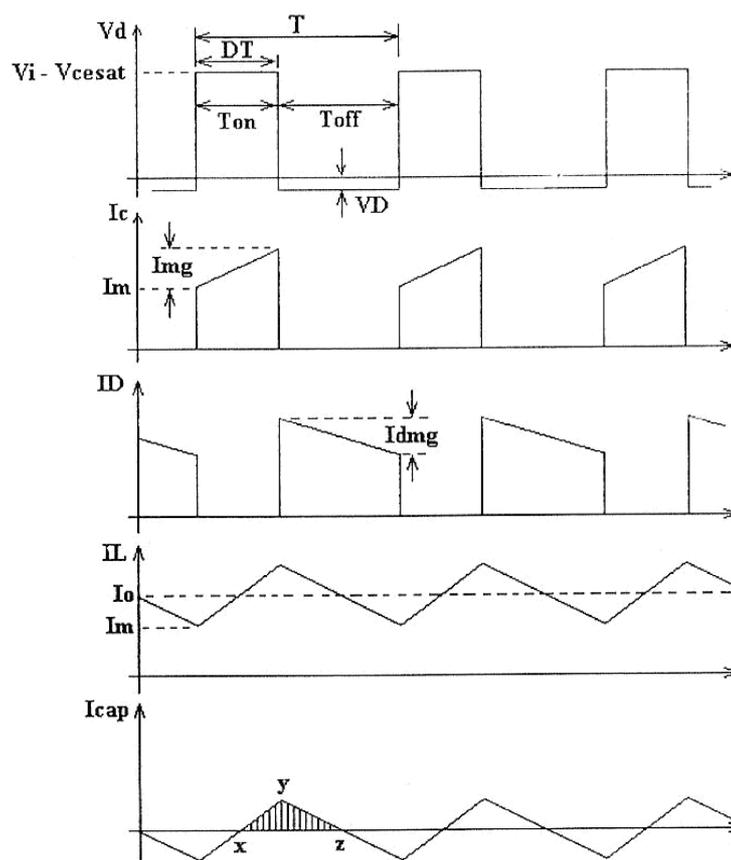


Figura 48. Formas de onda do conversor *buck*
(Fonte: Mello, 1988)

Quando o transistor entra em condução, o diodo D fica reversamente polarizado e a corrente que passa pelo indutor, passa também pelo transistor (T_{on}). A polaridade da tensão no indutor ocasiona uma corrente de magnetização do indutor I_{mg} , que durante o período de condução T_{on} será dada por:

$$I_{mg} = \frac{(V_i - V_{cesat} - V_o)T_{on}}{L} \quad (3.12)$$

Sendo:

- V_i – Tensão contínua de entrada
- V_{cesat} – Tensão de saturação do transistor
- V_o – Tensão contínua de saída na carga
- L – Indutância
- T_{on} – Tempo de condução do transistor

Quando o transistor entra em corte, o diodo D passa a conduzir a corrente do indutor, cuja corrente de desmagnetização é dada por:

$$I_{dmg} = \frac{(V_o + V_D)T_{off}}{L} \quad (3.13)$$

Sendo: V_D – Tensão direta no diodo
 T_{off} – Tempo de corte do transistor
 L – Indutância

Como a corrente no indutor não possui descontinuidade, pode-se afirmar que:

$$I_{mg} = I_{dmg} \quad (3.14)$$

O período T_{on} é definido como sendo a largura de pulso de chaveamento do conversor e a largura do pulso em função do período de chaveamento por:

$$T_{on} = DT \quad (3.15)$$

Sendo: D – Razão cíclica
 T – Período

Sendo D um valor adimensional, pode variar de 0 a 1. Logo o período T_{off} é dado por:

$$T_{off} = (1 - D)T \quad (3.16)$$

Assim as equações para I_{mg} e I_{dmg} podem ser reescritas da seguinte forma:

$$I_{mg} = \frac{(V_i - V_{cesat} - V_o)D}{L_f} \quad (3.17)$$

$$I_{dmg} = \frac{(V_o + V_D)(1 - D)}{L_f} \quad (3.18)$$

Igualando estas duas equações, obtém-se:

$$V_o = D(V_i - V_{cesat}) - V_D(1 - D) \quad (3.19)$$

Considerando os dispositivos de chaveamento (transistor ou mosfet e diodos) ideais, tem-se:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.20)$$

A equação para D relaciona a tensão de saída V_o com a largura de pulso D e a tensão de entrada V_i . Assim, neste tipo de conversor, a corrente de saída não influi na tensão de entrada, portanto, tem-se boa regulação contra a variação de corrente.

3.3.2 Operação em Modo Contínuo

O cálculo da tensão de saída V_o , por meio das equações para I_{mg} e I_{dmg} , só é possível porque a corrente de saída I_o possui determinado valor, que a corrente de magnetização e desmagnetização utiliza todo o período T, ou seja, estão continuamente circulando. Se a corrente de saída I_o diminuir, de modo a tornar o valor de $I_m = 0$ (figura 48), tem-se o limite entre o funcionamento, no modo contínuo e modo descontínuo (figura 49).

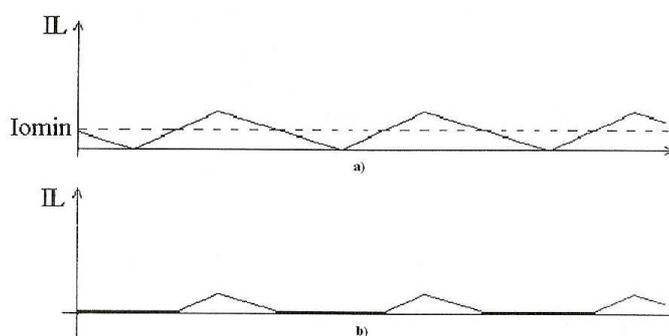


Figura 49. Corrente no indutor L

- a) Limite entre o modo contínuo e descontínuo
- b) Modo descontínuo de corrente

(Fonte: Mello, 1988)

A corrente limite mínima entre os dois modos é dada por:

$$I_{omín} = \frac{D(1-D)V_i}{2Lf_s} \quad (3.21)$$

Esta equação só é válida se a corrente de saída for maior ou igual a $I_{omín}$, e fornece um valor de indutor necessário para uma dada corrente mínima, $I_{omín}$. A escolha de $I_{omín}$ muito menor que a corrente nominal de saída, acarreta uso de indutor de ferrite com volume muito grande, além de aumentar, consideravelmente, o tempo de resposta à variações de corrente. No entanto, a corrente de magnetização no indutor diminui, ocasionando baixa ondulação de tensão na saída e baixa perda no ferrite. Existe, então, um compromisso de corrente mínima, em função da utilização e especificação da fonte a projetar.

O valor do indutor que fornece $I_{omín}$ deve sempre ser calculado na tensão máxima de entrada, ou seja:

$$L \geq \frac{D_{mín}(1-D_{mín})V_{imáx}}{2I_{omín}f_s} \quad (3.22)$$

É importante lembrar que a corrente de magnetização e desmagnetização é totalmente independente da corrente contínua que passa pelo indutor e, na realidade, no modo contínuo só tem-se desmagnetização completa do indutor no caso limite entre o modo contínuo e descontínuo.

3.3.3 Cálculo do Indutor

No modo de operação contínuo, o valor mínimo do indutor foi calculado pela equação de L dada anteriormente.

Para poder especificar o menor núcleo de ferrite que pode ser utilizado neste indutor, deve-se calcular o produto das áreas AP dado pela equação escrita a seguir:

$$Ap = \left(\frac{2E10^4}{K_u K_j B_{m\acute{a}x}} \right)^Z [cm^4] \quad (3.23)$$

Sendo: K_u – fator de utilização das janelas
 K_j – coeficiente de densidade de correntes nos fios
 $B_{m\acute{a}x}$ – densidade de fluxo (Tesla)
 E – energia máxima no indutor (Joule)
 Z – $1/(1 - x)$ onde x é um valor tabelado e depende do tipo de núcleo

A energia máxima é dada por:

$$E = \frac{1}{2} L_{m\acute{i}n} (I_{m\acute{a}x})^2 \quad (3.24)$$

Sendo: $I_{m\acute{a}x} = I_{om\acute{a}x} + I_{om\acute{i}n}$

Conhecendo-se o AP, a escolha do núcleo é imediata consultando-se um catálogo de núcleos de ferrite.

3.3.4 Cálculo do Capacitor

O capacitor em paralelo com a carga tem a função de diminuir a ondulação (*ripple*) causada pelo componente da corrente alternada do indutor (I_{mg} e I_{dmg}). Na figura 50, tem-se a forma de onda alternada da corrente do indutor e na figura 48, a forma de onda da tensão no capacitor devido a essa corrente.

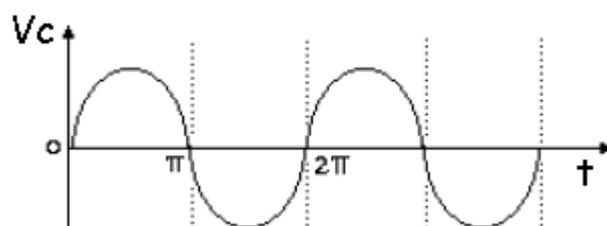


Figura 50. *Ripple* no capacitor de saída em um conversor *buck*

No modo contínuo, a quantidade de carga suprida para o capacitor pode ser calculada pela área do triângulo XYZ da figura 48. Assim, a carga ΔQ é dada por:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{I_{mg}}{2} \quad (3.25)$$

A variação de tensão em um capacitor está relacionada à carga que ele adquire, por:

$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q}{C} \quad \text{ou} \quad \Delta V_C = \frac{D(1-D)V_i}{8LCf^2} \quad (3.26)$$

Obs.: Adotou-se $V_o = DV_i$

Assim, o capacitor pode ser calculado em função de determinado nível de ondulação ΔV_C por:

$$C \geq \frac{D_{\min}(1-D_{\min})V_{i\max}}{8L\Delta V_C f^2} \quad (3.27)$$

O dimensionamento é realizado supondo que o capacitor possui resistência série nula. Na realidade, os capacitores possuem resistências série não desprezíveis, o que ocasiona uma tensão alternada de forma triangular (em fase com I_{mg} e I_{dmg}), que se soma ao valor calculado de ΔV_C . O valor de pico a pico da tensão desenvolvida na resistência série equivalente do capacitor (RSE) é dado pela equação a seguir:

$$\Delta V_{RSE} = I_{mg} RSE \quad (3.28)$$

De acordo com Mello (1988) como, normalmente, utiliza-se capacitância com valores elevados, principalmente para melhorar a resposta a transientes de corrente na saída, deve-se utilizar capacitores com valor muito maior que o

calculado e, então, a ondulação será dada, principalmente, pela resistência série equivalente do capacitor (RSE) e calculado em função de $I_{o\min}$ obtendo:

$$\Delta V_{RSE} máx = 2.I_{mg} RSE \quad (3.29)$$

Se desejar níveis de ondulação baixos (da ordem de alguns milivolts), a melhor solução é utilizar vários capacitores em paralelo, cujo $RSE_{máx}$ resultante garanta a ondulação desejada, caso não seja disponível um capacitor com RSE do valor desejado.

3.3.5 Resposta a Transitórios de Corrente

Esse tipo de conversor possui boa regulação quanto as variações de corrente, pois seu ganho estático V_o/V_i não é dependente da corrente de saída. (desprezando variações de V_{cesat} e V_D com a corrente)

Sendo assim, pode-se supor que durante mudanças rápidas no valor da corrente de saída, o circuito LC suprirá, totalmente, a corrente necessária tanto para aumentos, quanto para diminuições de corrente.

Durante o aumento da corrente de saída, o capacitor suprirá o acréscimo de corrente de saída e, conseqüentemente, sua tensão diminuirá (perda de carga) até que o indutor forneça o novo valor da corrente de saída. Na figura 51, tem-se o que acontece na tensão do capacitor durante um aumento de corrente de saída.

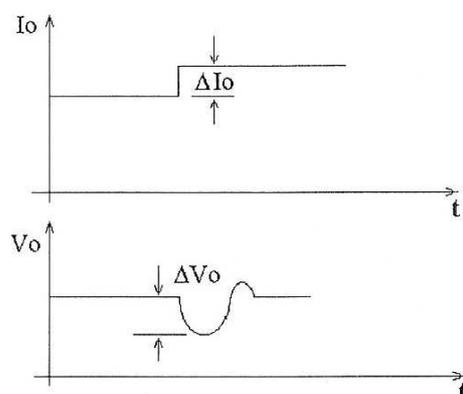


Figura 51. Transiente de corrente e tensão na saída do conversor *buck* (aumento de corrente)
(Fonte: Mello, 1988)

A subtensão ΔV_o gerada pela variação de corrente ΔI_o , pode ser calculada por:

$$\Delta V_o = \frac{D_{m\acute{a}x} L \Delta I_o^2}{(1 - D_{m\acute{a}x}) C V_o} \quad (3.30)$$

Observa-se a dependência com o circuito LC, o que leva sempre a minimizar o indutor e maximizar o capacitor. Como o valor do indutor é dependente do valor da corrente mínima $I_{o\text{mín}}$, deve-se utilizar a maior capacitância possível.

Durante uma diminuição de corrente de saída, a corrente em excesso no indutor será colocada no capacitor, ocasionando um aumento de tensão no capacitor, como mostrado na figura 52.

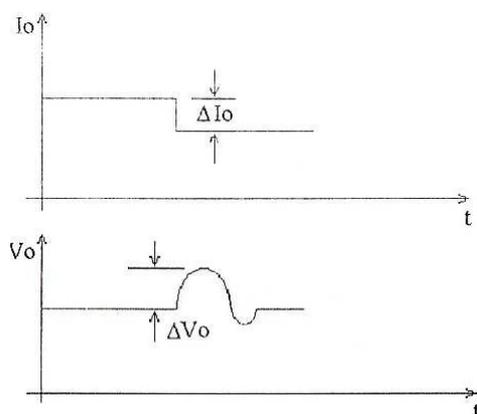


Figura 52. Transiente de corrente e tensão na saída de um conversor *buck* (diminuição de corrente)
(Fonte: Mello, 1988)

A sobretensão ΔV_o causada pela diminuição da corrente de saída pode ser calculada por:

$$\Delta V_o = \frac{L \Delta I_o^2}{C V_o} \quad (3.31)$$

Observa-se novamente a dependência da variação de tensão com o circuito LC.

A importância do dimensionamento correto do capacitor e indutor, com relação a sobretensão causada por variações bruscas de corrente, deve-se ao

fato de que o transiente de tensão pode acionar os circuitos de proteção e/ou alarmes, o que causaria problemas de funcionamento na fonte.

Além disso, esses transientes de tensão não devem ultrapassar os limites de tolerância da tensão nominal V_o .

Devido à resistência série do capacitor, o transiente é acrescido da queda de tensão dado por:

$$V_{RC} = I_o RSE \quad (3.32)$$

O correto dimensionamento do circuito de controle da largura de pulso (D) também é fundamental para conseguir os resultados mencionados.

3.3.6 Projeto do Conversor *Buck* (Parte de Potência)

Especificações do Projeto:

A tabela 9 apresenta as especificações técnicas para o projeto do conversor *buck* em atendimento das necessidades do sistema gerador de ozônio.

Tabela 9. Especificações elétricas para projeto do conversor *buck*

$f = 24 \text{ kHz}$	$I_{o\text{mín}} = 0,5 \text{ A}$
$V_o = 36,6 \text{ V } +/- 10\%$	$V_{i\text{mín}} = 127 \text{ V}$
$I_o = 5 \text{ A}$	$V_{i\text{máx}} = 339 \text{ V}$
Núcleo: Tipo EE	$V_D = 0,5 \text{ V}$
	$V_{\text{cesat}} = 1 \text{ V}$

A figura 53, apresenta o circuito eletrônico de potência da conversão *buck*. Por meio das especificações apresentadas na tabela 9, é possível calcular o valor e os parâmetros para a confecção do indutor e o valor do capacitor de saída. Os semicondutores são escolhidos de acordo com a tensão e corrente que circula em cada um, assim como a frequência de chaveamento.

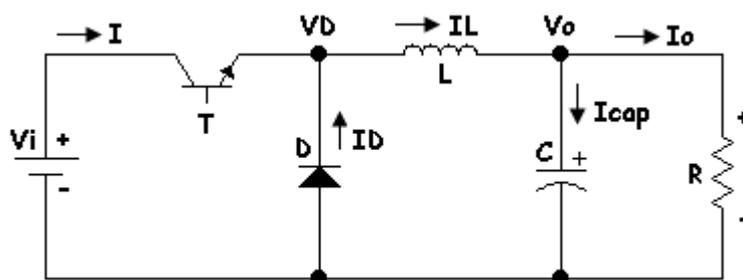


Figura 53. Circuito elétrico do conversor tipo *buck*

Seguem-se os cálculos do projeto do conversor *buck*, conforme o circuito do diagrama esquemático da figura 53, segundo especificações da tabela 9.

- Cálculo da largura de pulso máxima e mínima para o sinal de comando (PWM):

$$V_o = D(V_i - V_{cesat}) - V_D(1 - D) \quad (3.33)$$

$$D = \frac{V_o + V_D}{V_i - V_{cesat} + V_D} \quad (3.34)$$

Para a tensão de entrada máxima ($V_{imáx} = 339 \text{ V}$)

$$D_{mín} = 0,11 \quad (3.35)$$

Para a tensão de entrada mínima ($V_{imín} = 127 \text{ V}$)

$$D_{máx} = 0,29 \quad (3.36)$$

- Cálculo do Indutor:

$$L \geq \frac{D_{mín}(1 - D_{mín})V_{imáx}}{2I_{omín}f_s} \geq 1,38mH \quad (3.37)$$

- Energia Armazenada no Indutor:

$$E = \frac{1}{2} L(I_{m\acute{a}x})^2 = \frac{1}{2} L(I_o + I_{om\acute{i}n})^2 = 20,87mJ \quad (3.38)$$

- Escolha do Núcleo:

$E = 20,87 \text{ mJ}$; $K_u = 0,4$; $K_j = 397$; $B_{m\acute{a}x} = 0,3T$; $x = 0,12$ (para núcleo EE)

$$Z = \frac{1}{1-x} = 1,136 \quad (3.39)$$

$$Ap = \left(\frac{2E10^4}{K_u K_j B_{m\acute{a}x}} \right)^Z = 11,77cm^4 \quad (3.40)$$

Consultando-se um catálogo de núcleos de ferrite, chega-se imediatamente ao núcleo EE55/28/21, com $AP = 14,91 \text{ cm}^4$.

- Cálculo do Fator de Indutância:

$$Al = \frac{Ae^2 B_{m\acute{a}x}^2}{2E} = 270,21nH / esp^2 \quad (3.41)$$

Onde, $Ae = 3,54 \cdot 10^{-4} m^2$, fornecido pelo catálogo de núcleos.

Logo, tem-se para o núcleo escolhido uma área efetiva (Al) de $270,21nH/espira^2$.

- Cálculo do Entreferro (Gap):

$$\mu e = \frac{Al e}{\mu_0 Ae} = 74,71 \quad (3.42)$$

Logo,

$$lg = \frac{l e}{\mu e} = 1,65mm \quad (3.43)$$

Onde, $l e = 12,3 \text{ cm}$, fornecido pelo catálogo de núcleos.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Tm/A}$.

Logo, tem-se um *gap* de largura total 1,65mm.

- Cálculo do Número de Espiras do Indutor:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = 71,46 \text{ espiras} \quad (3.44)$$

- Cálculo da Densidade de Corrente:

$$J = KjAp^{-0,12} = 287,06 \text{ A/cm}^2 \quad (3.45)$$

- Cálculo do Cobre:

$$A_{cu} = \frac{I_o}{J} = 1,742 \text{ mm}^2 \quad (3.46)$$

Consultando uma tabela de fio de cobre, tem-se que o fio 14 AWG pode ser utilizado. Considerando o efeito *Skin*, adota-se 4 fios 20 AWG em paralelo.

Finalmente, tem-se um indutor com as seguintes características:

Núcleo: EE55/28/21

Número de Espiras: 71,46

Bitola do Fio de Cobre: 14 AWG

Entreferro: 1,65 mm

Indutância: 1,38 mH

Energia Máxima: 20,87 mJ

- Cálculo do Capacitor de Saída:

a) Supondo uma ondulação de 100 mV, tem-se:

$$C \geq \frac{D_{\min} (1 - D_{\min}) V_{\text{imáx}}}{8L\Delta V_c f^2} \geq 52,2 \mu\text{F} \quad (3.47)$$

De acordo com Mello (1988) adota-se um capacitor de saída cerca de 10 vezes maior, para que só a componente de tensão devida à resistência série equivalente do capacitor influa na ondulação. Portanto, adota-se um valor comercial de 680 μF .

b) Verificação da resposta à variações de corrente:

- Aumento de corrente:

$$\Delta V_o = \frac{D_{m\acute{a}x} L (\Delta I_o)^2}{(1 - D_{m\acute{a}x}) C V_o} = 0,566V \quad (3.48)$$

Como a tolerância da tensão de saída está especificada em +/- 10%, pode-se ter uma variação de até 3,66 V, porém o valor calculado para a variação foi de 0,566 V comprovando a eficácia do capacitor calculado.

- Diminuição de corrente:

$$\Delta V_o = \frac{L (\Delta I_o)^2}{C V_o} = 1,39V \quad (3.49)$$

c) Cálculo da ondulação:

$$V_{RC} = 2I_o RSE = 1V_{pp} \quad (3.50)$$

Supondo uma RSE de 0,1 Ω , tem-se 1 V_{pp}.

A figura 54 apresenta o circuito de potência completo do conversor *buck* projetado, na prática houve a necessidade de alguns ajustes em valores de componentes.

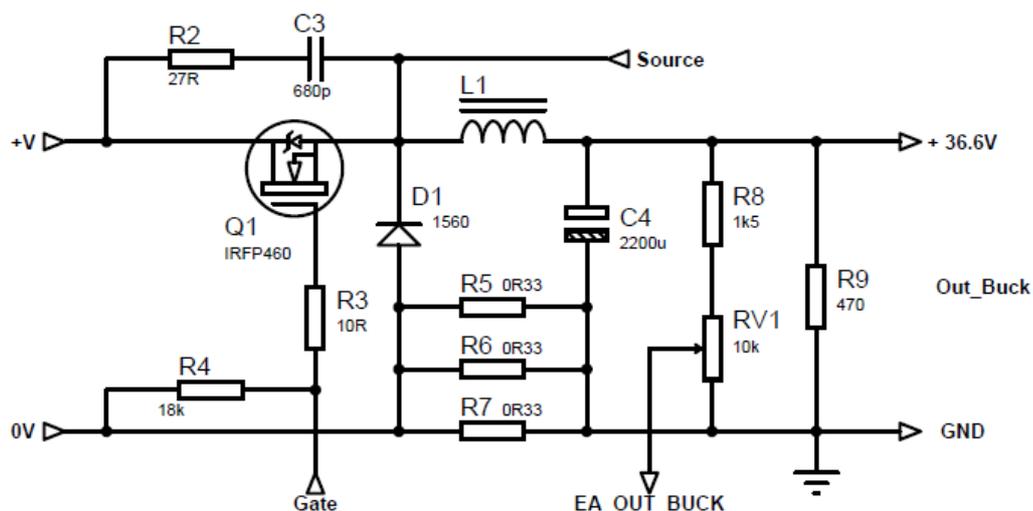


Figura 54. Circuito completo do conversor *buck*

Os sinais +V e 0V representam a tensão retificada e filtrada proveniente do circuito retificador que alimenta o conversor *buck*.

3.4 Modelagem do Circuito de Controle Analógico

Em todos os tipos de conversão, existe uma equação que relaciona a tensão de entrada e saída, conhecida como função de transferência da conversão. Para a conversão *buck* (modo contínuo), tem-se:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.51)$$

Nesta equação, pode-se notar que a largura de pulso de chaveamento (D) é o parâmetro que deve variar, para compensar variações da tensão de entrada e corrente de saída.

O valor de D (razão cíclica) é a razão entre o tempo de condução do transistor e o período de chaveamento, assim:

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (3.52)$$

Sendo: T_{on} – Tempo de condução da chave;
 T – Período de chaveamento;

Numa fonte de tensão, o valor de D deve ser corrigido continuamente para evitar variações de tensão, quando da ocorrência de uma variação de tensão de entrada ou carga, para manter a tensão de saída estável.

Essa correção e geração de D é feita por circuitos de controle de largura de pulso. O circuito de controle é basicamente um oscilador tipo PWM (*Pulse Width Modulator*), no qual a largura dos pulsos de saída é controlada por um sinal de controle. Este sinal é gerado por um amplificador de erro a partir da diferença entre uma tensão de referência constante e uma amostra da tensão de saída. Há, portanto um processo de realimentação negativa que faz com que variações na tensão de saída sejam compensadas por meio da variação da largura de pulso do sinal de controle do transistor. A figura 55 mostra o diagrama de blocos da conversão CC/CC com o circuito de controle D.

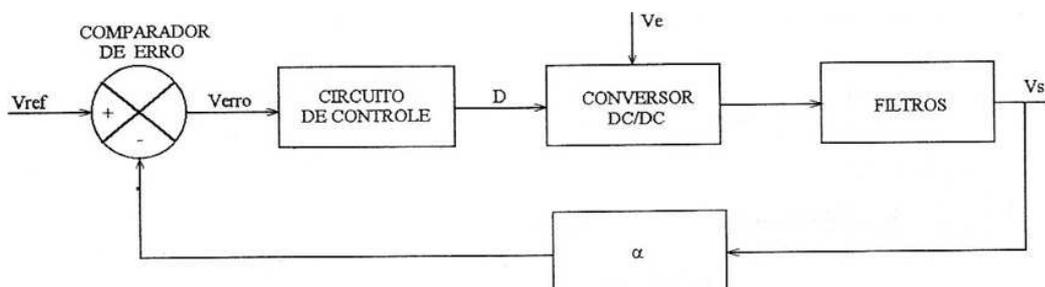


Figura 55. Diagrama de blocos do controle do conversor CC/CC
 (Fonte: Mello, 1988)

No diagrama da figura 55, observa-se que a tensão de saída é atenuada pelo bloco α e é comparada com uma tensão de referência (V_{ref}) que por sua vez, gera uma tensão de erro (V_{erro}) que vai ao circuito de controle de onde se obtém D . Os filtros são compostos pelos circuitos RLC da saída do conversor e cada tipo de circuito possui características próprias de filtragem.

Nota-se então, que uma fonte chaveada é formada por um *Loop* com realimentação negativa que visa manter constante a tensão de saída V_s .

3.4.1 Estabilidade de Conversores CC/CC Realimentados

- Realimentação

Os circuitos de conversão CC/CC fornecem certa tensão contínua por meio de transformações de tensão de uma fonte primária em pulsos que, após filtragem, fornecem a tensão desejada.

A figura 56 apresenta um bloco conversor CC/CC mostrando os parâmetros de entrada e saída.

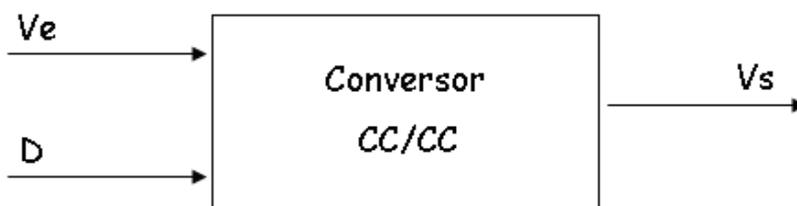


Figura 56. Parâmetros de entrada e saída em um conversor CC/CC
(Fonte: Mello, 1988)

A figura 56 mostra que o bloco do conversor CC/CC é composto por duas entradas e uma saída (tensão). A tensão V_e é a fonte de energia para a saída e D (largura de pulso) é o fator que permite o controle do nível da tensão V_s .

O controle da tensão V_s é obtido comparando a tensão de saída V_s com uma tensão de referência (V_{ref}), por meio de um amplificador de erro que fornece uma tensão (V_c) para que o circuito de controle gere a largura de pulso (D) necessária para manter V_s proporcional a V_{ref} . Sendo V_{ref} uma tensão constante (invariante com o tempo e temperatura), V_s também será.

No entanto, em circuitos com realimentação, pode ocorrer instabilidade (tendência a oscilações), que torna o conversor sensível a variações bruscas de tensão de entrada e corrente de saída.

Um conversor ideal não deve sofrer variações na tensão V_s , quando houver variação de corrente na saída, ou na tensão de entrada.

Na prática, a tensão de saída pode apresentar um *overshoot* e, quanto menor o período do *overshoot*, melhor é a performance do conversor.

Para analisar o comportamento de um circuito com realimentação, com relação a instabilidade, é necessário conhecer a função de transferência de Loop aberto.

O diagrama em blocos da figura 57 representa um circuito com realimentação negativa, semelhante ao apresentado anteriormente.

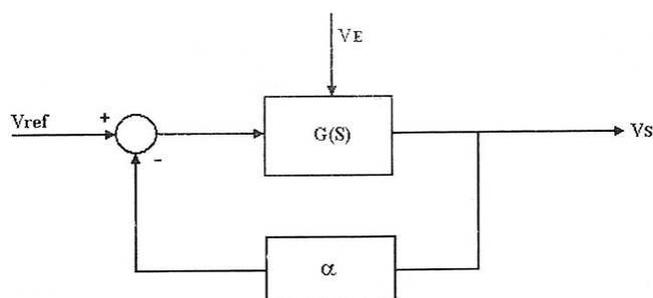


Figura 57. Diagrama de blocos de um circuito com realimentação negativa (Fonte: Mello, 1988)

A função de transferência é dada por:

$$\frac{V_s}{V_{ref}} = \frac{G(s)}{1 + \alpha G(s)} \quad (3.53)$$

Para garantir a estabilidade do sistema realimentado é suficiente, que a função de transferência seja da forma:

$$\frac{V_s}{V_{ref}} = \frac{J}{1 + \frac{s}{\omega k}} \quad (3.54)$$

Sendo: $s = j\omega = j2\pi f$
 $\omega k = 2\pi f k$
 J – ganho quando $f = 0$

A plotagem de amplitude e fase em relação à frequência (*Bode Plot*) é dada na figura 58.

Para obter a função de transferência anterior, a função $G(s)$ deve ser do tipo:

$$G(s) = \frac{K}{s} \quad (3.55)$$

e obtém-se,

$$\frac{V_s}{V_{ref}} = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega k}} \quad (3.56)$$

Sendo: $\omega k = \alpha K$

Este tipo de resposta em frequência fornece margem de ganho infinita e margem de fase 90°. Assim, é totalmente estável, não apresentando *overshoot*.

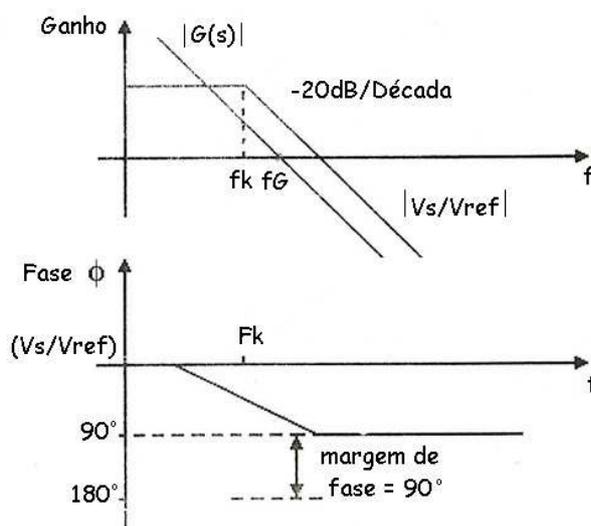


Figura 58. Resposta em frequência em amplitude e fase
(Fonte: Mello, 1988)

A função de transferência da conversão CC/CC possui, normalmente, pólos e zeros que devem ser compensados para obter a forma da equação:

$$\frac{V_s}{V_{ref}} = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega k}} \quad (3.57)$$

A figura 59 apresenta o diagrama de Bode para a função de transferência.

O valor de K deve ser feito o maior possível, para que a regulação (ganho em baixa frequência) de tensão seja a melhor possível.

O ganho em baixa frequência está limitado pelo ganho do amplificador de erro e pela frequência, quando $|G(s)|=1$. Sendo f_c a frequência (crítica) quando $|G(s)|=1$ e f_s a frequência de chaveamento do conversor, pode ser mostrado que f_c deve obedecer a seguinte equação:

$$f_c \leq \frac{f_s}{2\pi D} \quad (3.58)$$

para não ocasionar instabilidade na função de transferência anterior.

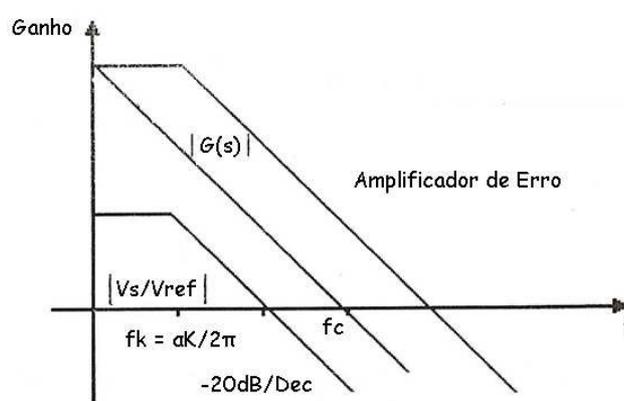


Figura 59. Diagrama de Bode para a função de transferência (Fonte: Mello, 1988)

3.4.2 Modelo para Análise de Estabilidade

Realimentação por Amostragem de Tensão de Saída

Este tipo de realimentação é o mais usual e é o modo ilustrado na figura 60, e explicado a seguir.

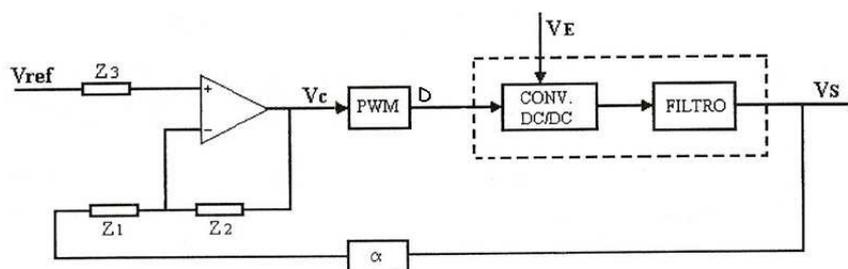


Figura 60. Diagrama de blocos do controle (Fonte: Mello, 1988)

O bloco α é constituído, normalmente, de divisor de tensão (resistivo) e, se a tensão V_s for igual a V_{ref} , o valor de α é 1. No caso geral, tem-se:

$$\alpha = \frac{V_{ref}}{V_s} \quad (3.59)$$

O amplificador de erro faz a compensação em frequência para obter a função de transferência dada anteriormente, assim:

$$\frac{V_c}{\alpha V_s} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.60)$$

Z_3 deve ser utilizado para compensar a tensão de offset do amplificador operacional.

O modulador de largura de pulso (PWM) não possui pólos e zeros e é constante para cada tipo de controlador. Se V_{cm} é a amplitude de pico a pico da rampa de comparação (capacitor) (figura 61), o valor de D é:

$$\frac{D}{V_c} = \frac{k_c}{V_{cm}} \quad (3.61)$$

Sendo: $0 \leq k_c \leq 1$ e $0 \leq V_c \leq V_{cm}$

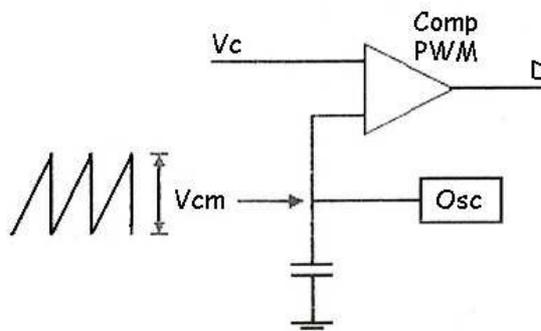


Figura 61. Amplificador operacional
(Fonte: Mello, 1988)

k_c depende da limitação da máxima largura de pulso que pode ser obtida. No circuito integrado 3524, por exemplo, quando os dois transistores de saída estão com os coletores e emissores interligados, tem-se $k_c = 1$. Se utilizar apenas uma saída, $k_c = 0,5$. Existe outro modo de limitar a largura de pulso máxima, que é feito diminuindo-se a máxima excursão possível, ou seja, diminuindo-se V_c .

A conversão CC/CC e o filtro devem ser analisados juntos devido às interações que ocorrem entre si. Para o cálculo da função de transferência V_s/D , o método usual é por “*State Space Averaging*”.

Será efetuada uma análise para o conversor *buck* e, com isso, pode-se calcular o circuito de compensação.

3.4.3 Buck Modo Contínuo

A figura 62 mostra o conversor *buck* a ser analisado.

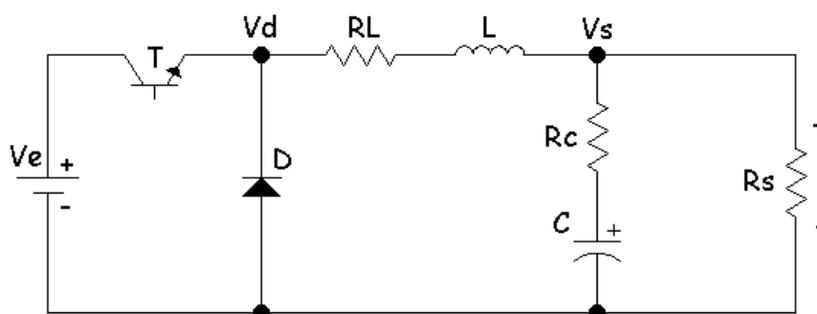


Figura 62. Circuito elétrico equivalente para o controle por realimentação de tensão

A tensão de saída para o circuito da figura 62 é dada por:

$$V_s = \frac{R_s \left(R_c + \frac{1}{sC} \right)}{R_s + \left(R_c + \frac{1}{sC} \right)} \frac{R_s \left(R_c + \frac{1}{sC} \right)}{(R_L + sL) + \frac{R_s \left(R_c + \frac{1}{sC} \right)}{R_s + \left(R_c + \frac{1}{sC} \right)}} V_{dméd} \quad (3.62)$$

Colocando em evidência $1/sC$ e simplificando no numerador e denominador, obtém-se:

$$V_s = \frac{\frac{sCR_s R_c + R_s}{sC(R_s + R_c) + 1}}{(R_L + sL) + \frac{sCR_s R_c + R_s}{sC(R_s + R_c) + 1}} DV_e \quad (3.63)$$

Simplificando, tem-se:

$$V_s = \frac{R_s (sCR_c + 1)}{(R_L + sL)(sCR_s + sCR_c + 1) + sCR_s R_c + R_s} DV_e \quad (3.64)$$

Aplicando a propriedade distributiva e agrupando a equação anterior, resulta:

$$V_s = \frac{R_s (1 + sCR_c)}{R_L + R_s + sC \left(R_L R_s + R_L R_c + R_s R_c + \frac{L}{C} \right) + s^2 LC (R_s + R_c)} DV_e \quad (3.65)$$

Colocando R_s em evidência no denominador e fazendo a consideração de que R_s é muito maior que R_c e R_L , chega-se finalmente a equação:

$$V_s = DV_e \frac{1 + sCR_c}{1 + sC \left(R_L + R_c + \frac{L}{CR_s} \right) + s^2 LC} \quad (3.66)$$

Observa-se que a equação anterior possui um zero e dois pólos para o controle por realimentação da tensão, dificultando a compensação.

Esta equação pode ser reescrita como:

$$V_s = DV_e \frac{1 + sCR_c}{1 + sCR_x + s^2 LC} \quad (3.67)$$

Sendo: $R_x = R_c + R_L + L/(CR_c)$
 R_c – resistência série do capacitor
 R_L – resistência série do indutor

Tem-se, que:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \zeta = \frac{CR_x \omega_r}{2} \quad \omega_z = \frac{1}{CR_c}$$

O diagrama de Bode para a função de transferência, dada pela equação 3.67, é mostrado pela figura 63.

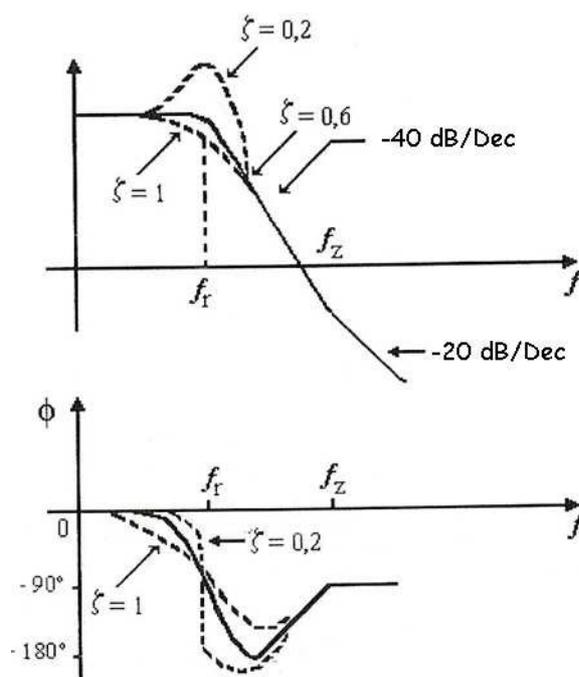


Figura 63. Diagrama de Bode
 (Fonte: Mello, 1988)

Observa-se que um fator de amortecimento ζ menor que 0,3 produz um aumento de ganho perto da frequência de ressonância e uma variação abrupta de fase. Isso, normalmente, é difícil de ser compensado com zeros simples. O fator de amortecimento ideal deve ter o valor $\zeta = 1$, para que os dois pólos possam ser compensados por dois zeros simples implementados no amplificador de erro.

Os efeitos da variação de R_x sobre o posicionamento dos pólos pode tornar o circuito difícil de ser compensado, para corrente de saída alta, pois ocasionam uma margem de fase menor do que os 90° esperados. Margem de fase de 45° pode ser usada sem ocorrer *overshoot* de duração e amplitude de valores altos.

Outros tipos de conversores de tipo *buck*, com filtro LC na saída, também possuem essa mesma função de transferência (*forward*, *push-pull*, meia ponte, etc) com o acréscimo da relação de espiras N .

3.4.4 Circuitos para Compensação em Frequência

O projeto de um conversor CC/CC deve atender a dois requisitos básicos: estabilidade e performance.

A estabilidade é o fator fundamental, pois não se pode medir performance de um sistema instável, ou seja, com tendências a oscilações ou oscilando.

Os conversores CC/CC são estáveis, entretanto, para obter boa performance, deve-se utilizar circuitos de compensação que, alterando a função de transferência do conversor, melhore a sua performance.

O circuito de compensação é obtido aproveitando-se o amplificador de erro e o circuito de compensação Z_1 e Z_2 .

Pela equação:

$$\frac{V_c}{\alpha V_s} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.68)$$

obtem-se a variação da tensão de saída contra variações na tensão de referência, que é dada por:

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta V_{ref}} = \frac{1}{\alpha} \quad (3.69)$$

Com a equação 3.68 obtém-se a regulação contra variações de corrente de saída e tensão de entrada, já que, V_c varia proporcionalmente a D . Assim:

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta V_c} = \frac{1}{\alpha} \frac{Z_1(\omega=0)}{Z_2(\omega=0)} \quad (3.70)$$

Normalmente, faz-se $Z_1(\omega=0) = 0$, o que acarretará $\frac{\Delta V_s}{\Delta V_c} = 0$. Isto é obtido, fazendo-se:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{D(s)}{sQ(s)} \quad (3.71)$$

De modo geral, conhecido o valor de $D_{m\acute{a}x}$ e $D_{m\acute{i}n}$, obtém-se ΔV_c por:

$$\Delta V_c = \frac{V_{cm}}{k_c} (D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}) \quad (3.72)$$

Assim, a variação estática total da tensão de saída é dada por:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta V_{ref}}{\alpha} + \frac{Z_1(\omega=0)\Delta V_c}{\alpha Z_2(\omega=0)} \quad (3.73)$$

Analisado anteriormente que a função de transferência de malha aberta do sistema deve ter a seguinte forma:

$$C(s) = \alpha G(s) = \frac{\alpha K}{s} \quad (3.74)$$

Pelo circuito da figura 58, a função de transferência pode ser obtida computando-se as funções de transferência individual de cada bloco. Assim:

$$C(s) = \alpha \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \frac{D}{V_c} \frac{V_s}{D} \quad (3.75)$$

Em alguns casos, D não pode ser obtido diretamente e tem-se:

$$C(s) = \alpha \frac{Z_2(s) V_s}{Z_1(s) V_c} \quad (3.76)$$

Então, deve-se calcular Z1 e Z2 de tal forma que, a função de transferência obtida seja da forma da:

$$C(s) = \alpha G(s) = \frac{\alpha K}{s} \quad (3.77)$$

Os circuitos de Z1 e Z2 devem ser tais que gerem pólos e zeros, que cancelam os zeros e pólos do circuito de conversão e filtragem.

3.4.5 Circuito de Compensação (*Buck* – Modo Contínuo)

$$C(s) = \alpha \frac{Z_2}{Z_1} \frac{D}{V_c} \frac{V_s}{D} \quad (3.78)$$

$$\frac{V_s}{D} = V_e \frac{1 + sCR_c}{1 + sCR_x + s^2LC} \quad (3.79)$$

$$\frac{D}{V_c} = \frac{k_c}{V_{cm}} \quad (3.80)$$

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{(1 + sC_2R_3)(1 + sCR_1 + R_2)}{sC_2R_2(1 + sC_1R_1)} \quad (3.81)$$

A figura 64 mostra o projeto do compensador.

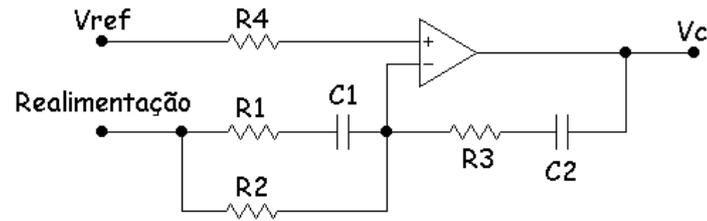


Figura 64. Projeto do compensador para o conversor *buck* modo contínuo
(Fonte: Mello, 1988)

Fazendo-se:

$$\begin{aligned} C_1 R_1 &= C R_c \\ C_2 R_3 &= \sqrt{LC} \\ C_1 (R_1 + R_2) &= \sqrt{LC} \end{aligned} \quad (3.82)$$

Obtém-se:

$$C(s) = \frac{\alpha k_c V_e}{V_{cm} C_2 R_2} \frac{1}{s} \quad (3.83)$$

E quando $|C(s)| = 1$, chega-se em:

$$f_c = \frac{\alpha k_c V_e}{2\pi V_{cm} C_2 R_2} \quad (3.84)$$

Relembrando que:

$$f_c \leq \frac{f_s}{2\pi D} \quad (3.85)$$

Sendo: f_s – frequência de chaveamento

A figura 65 apresenta o diagrama de Bode da função $C(s)$.

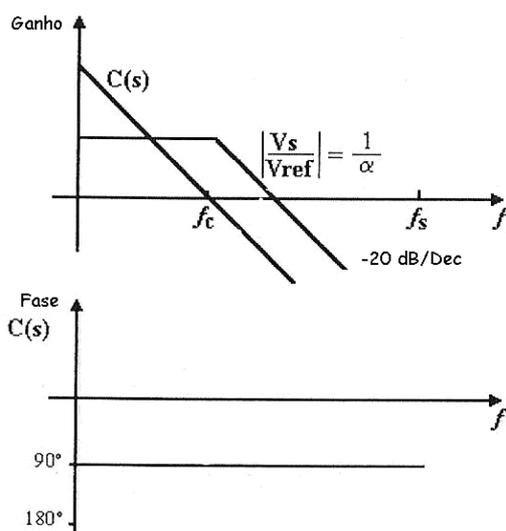


Figura 65. Diagrama de Bode com compensador
(Fonte: Mello, 1988)

3.4.6 Projeto do Circuito de Controle Analógico

Especificações:

A tabela 10 apresenta as especificações elétricas necessárias para os cálculos dos componentes do circuito de controle analógico.

Tabela 10. Especificações elétricas para projeto do circuito de controle

F = 24 kHz	Dados calculados:
$V_s = 36,6 \text{ V} \pm 10\%$	$L = 1,38 \text{ mH}$
$I_{sm\acute{a}x} = 5 \text{ A}$	$C = 680 \mu\text{F}$
$I_{sm\acute{i}n} = 0,5 \text{ A}$	$(R_c) RSE \leq 100 \text{ m}\Omega$
$V_{em\acute{i}n} = 127 \text{ V}$	$R_L = 50 \text{ m}\Omega$
$V_{em\acute{a}x} = 339 \text{ V}$	$D_{m\acute{a}x} = 0,29$
	$D_{m\acute{i}n} = 0,11$

Por meio das especificações apresentadas na tabela 10, calcula-se os valores dos resistores de R1 a R6, além dos capacitores C1 e C2 mostrados na figura 66 que apresenta o circuito implementado, controle analógico e potência.

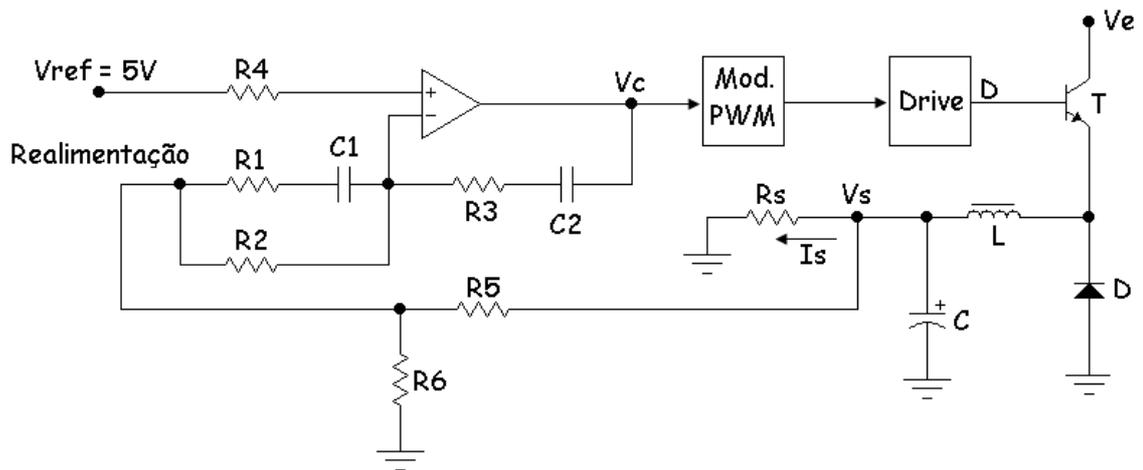


Figura 66. Circuito implementado, controle e potência

Tem-se que:

$$C_1 R_1 = C R_c$$

$$C_2 R_3 = \sqrt{LC}$$

$$C_1 (R_1 + R_2) = \sqrt{LC}$$

$$R_x = R_c + R_L + \frac{L}{C R_s}$$

Sabendo que,

$R_c = 100 \text{ m}\Omega$, $R_L = 50 \text{ m}\Omega$, $L = 1,38 \text{ mH}$, $C = 680 \text{ }\mu\text{F}$, calcula-se R_s por:

$$V_{sm\acute{a}x} = R_s I_{sm\acute{a}x} \Rightarrow R_s = \frac{V_{sm\acute{a}x}}{I_{sm\acute{a}x}} = 8,05 \Omega$$

$$R_x = 402,1 \text{ m}\Omega$$

Cálculo do fator de amortecimento:

$$\zeta = \frac{C R_x \omega r}{2}, \text{ sendo } \omega r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 1032,3 \text{ rad / s}$$

$$\text{Ent\~{a}o, } \zeta = \frac{C R_x \omega r}{2} = 0,141$$

De acordo com Mello (1988) um fator de amortecimento $\zeta \approx 0,141$ torna abrupta a variação da fase $\Delta\phi$ e ocorrência de *overshoot* na resposta em frequência perto de ω_p . Para compensar esses efeitos, coloca-se os zeros numa frequência menor que ω_p ($\omega_p = 1/(LC)^{-1/2}$), em uma frequência ω_2 metade de ω_p , então:

$$\begin{aligned} C_1 R_1 &= 2CR_c \\ C_2 R_3 &= 2\sqrt{LC} \\ C_1(R_1 + R_2) &= 2\sqrt{LC} \end{aligned} \quad (3.86)$$

Usando-se um circuito de controle do tipo 3524A, deve-se colocar R3 com valor alto, pois como o amplificador de erro é um amplificador de transcondutância, o ganho estático ($\omega = 0$) depende da resistência de carga e, quanto maior o resistor, maior o ganho, supondo que a resistência mínima seja R3 e fazendo-se R3 = 1 M Ω tem-se um ganho máximo de 66 dB. Como para sinais contínuos o capacitor C2 possui impedância infinita, o que corresponde a um circuito aberto, o ganho máximo quando $\omega = 0$ é o limite do amplificador sem realimentação, ou seja, 80 dB. A frequência f_c limita o ganho de malha aberta do circuito.

Cálculo da frequência de corte (f_c):

$$f_c \leq \frac{f_s}{2\pi D}, \text{ sendo } f_s = 24 \text{ kHz e } D_{\text{máx}} = 0,29, \text{ tem-se}$$

$$f_c \leq \frac{f_s}{2\pi D} = 13,17 \text{ kHz}$$

De acordo com Mello (1988) como margem de segurança, adota-se uma frequência de corte 40% menor, então: $f_c = 7,902 \text{ kHz}$.

$$f_c = \frac{\alpha k_c V_e}{2\pi V_{cm} C_2 R_2}$$

Onde: $\alpha = \frac{V_{ref}}{V_s} = 0,1366$, $k_c = 1$, $V_e = 339V$, $V_{cm} = 2,5$

$$\longrightarrow C_2 R_2 = 0,0003730 \Rightarrow (1)$$

$$\begin{cases} (2) \Rightarrow C_1 R_1 = 0,000136 \\ (3) \Rightarrow C_2 R_3 = 0,001937 & \Rightarrow \text{como } R_3 = 1M\Omega, \text{ent\~{a}o :} \\ (4) \Rightarrow C_1 (R_1 + R_2) = 0,001937 \end{cases}$$

De (3) tem-se: $C_2 R_3 = 0,001937 \Rightarrow C_2 = 1,937nF$

De (1) tem-se: $C_2 R_2 = 0,0003730 \Rightarrow R_2 = 192,6k\Omega$

De (4) tem-se: $C_1 R_1 + C_1 R_2 = 0,001937 \Rightarrow C_1 = 9,35nF$

De (2) tem-se: $C_1 R_1 = 0,000136 \Rightarrow R_1 = 14,55k\Omega$

Os resistores R_5 e R_6 devem ser calculados por:

$$\alpha = \frac{R_5}{R_5 + R_6}$$

$$\frac{R_1 R_2}{R_2 + R_2} \gg \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}, \text{ tem-se que: } \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_2} = 13,53k\Omega$$

De acordo com Mello (1988) pode-se utilizar $\frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} \leq 1,353k\Omega$, que

corresponde a 10% de $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, fazendo:

$$R_6 = 2,2k\Omega \text{ e } R_5 = 3,3k\Omega, \text{ tem-se: } \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} = 1,32k\Omega$$

$$R_4 = \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = 161,5 \text{ k}\Omega$$

Chegando-se aos valores apresentados na tabela 11:

Tabela 11. Resumo dos valores calculados

$R_1 = 14,55 \text{ k}\Omega$
$R_2 = 192,6 \text{ k}\Omega$
$R_3 = 1 \text{ M}\Omega$
$R_4 = 161,5 \text{ k}\Omega$
$R_5 = 3,3 \text{ k}\Omega$
$R_6 = 2,2 \text{ k}\Omega$
$C_1 = 9,35 \text{ nF}$
$C_2 = 1,937 \text{ nF}$

A figura 67 apresenta o circuito implementado, compensador e potência.

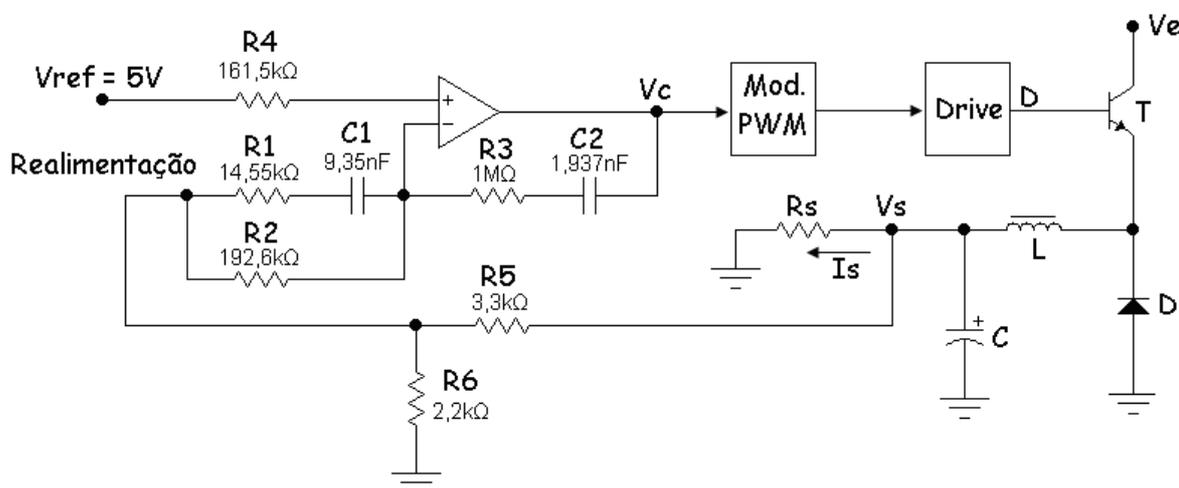


Figura 67. Circuito implementado, compensador e potência

3.4.7 Controlador PID com Amplificadores Operacionais

- Impedâncias Complexas (Método da Impedância, Z)

Na obtenção de funções de transferência de circuitos elétricos, com frequência acha-se preferível escrever diretamente a transformada de Laplace das equações, sem a necessidade de escrever as equações diferenciais.

Deve-se lembrar que a abordagem da impedância é válida somente se as condições iniciais envolvidas forem nulas. Nessas condições, a determinação da função de transferência de um circuito elétrico pode ser obtida a partir do conceito de impedância complexa. Essa abordagem simplifica muito a dedução das funções de transferência de circuitos elétricos.

A figura 68 mostra um controlador eletrônico proporcional-integral-derivativo (PID) com amplificadores operacionais. A função de transferência $E(s)/E_i(s)$ é dada por:

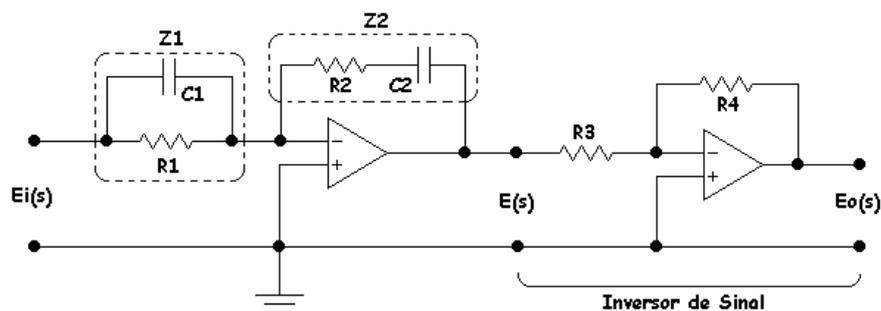


Figura 68. Controlador eletrônico PID

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.87)$$

Onde,

$$Z_1 = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \quad \text{e} \quad Z_2 = \frac{R_2 C_2 s + 1}{C_2 s} \quad (3.88)$$

Assim,

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = -\left(\frac{R_2 C_2 s + 1}{C_2 s}\right) \left(\frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1}\right) \quad (3.89)$$

Notando que,

$$\frac{E_o(s)}{E(s)} = -\frac{R_4}{R_3} \quad (3.90)$$

Tem-se,

$$\frac{E_o(s)}{Ei(s)} = \frac{E_o(s)}{E(s)} \frac{E(s)}{Ei(s)} = \frac{R_4 R_2 (R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_3 R_1 R_2 C_2 s} \quad (3.91)$$

$$\frac{E_o(s)}{Ei(s)} = \frac{R_4 R_2}{R_3 R_1} \left(\frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2 s} + R_1 C_1 s \right) \quad (3.92)$$

$$\frac{E_o(s)}{Ei(s)} = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \left[1 + \frac{1}{(R_1 C_1 + R_2 C_2) s} + \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} s \right] \quad (3.93)$$

Observa-se que o segundo amplificador operacional atua tanto como um inversor de sinal como um ajuste de ganho.

Quando um controlador PID é expresso como:

$$\frac{E_o(s)}{Ei(s)} = K_p \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) \quad (3.94)$$

K_p é chamado de ganho proporcional, T_i é chamado de tempo integral e T_d , de tempo derivativo. A partir da equação

$$\frac{E_o(s)}{Ei(s)} = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \left[1 + \frac{1}{(R_1 C_1 + R_2 C_2) s} + \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} s \right] \quad (3.95)$$

Obtém-se o ganho proporcional K_p , o tempo integrativo T_i e o tempo derivativo T_d , como:

$$K_p = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \quad (3.96)$$

$$T_i = \frac{1}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \quad (3.97)$$

$$T_d = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \quad (3.98)$$

Quando um controlador PID é expresso como:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.99)$$

K_p é chamado de ganho proporcional, K_i de ganho integrativo e K_d , de ganho derivativo. Para esse controlador,

$$K_p = \frac{R_4(R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \quad (3.100)$$

$$K_i = \frac{R_4}{R_3 R_1 C_2} \quad (3.101)$$

$$K_d = \frac{R_4 R_2 C_1}{R_3} \quad (3.102)$$

A tabela 12 mostra uma lista de circuitos com amplificadores operacionais que podem ser utilizados como controladores ou compensadores.

Com as equações para K_p , K_i e K_d obtidas e também os valores dos resistores e capacitores do circuito compensador, pode-se então calcular esses valores para o conversor projetado, como segue:

$$K_p = \frac{R_4(R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} = 2,92$$

$$K_i = \frac{R_4}{R_3 R_1 C_2} = 5,73 \cdot 10^3$$

$$K_d = \frac{R_4 R_2 C_1}{R_3} = 0,291 \cdot 10^{-3}$$

Na figura 68 o valor de R_1 corresponde ao valor do resistor R_2 calculado da figura 67, assim como o valor de R_2 da figura 68 corresponde ao valor do resistor R_3 da figura 67. Os valores de R_3 e R_4 da figura 68 foram adotados

iguais, isso para ocorrer apenas a inversão do sinal de entrada e não ocorrer amplificação deste sinal.

A tabela 12 apresenta alguns circuitos com amplificadores operacionais que comumente são utilizados como compensadores.

Tabela 12. Circuitos com amplificadores operacionais que podem ser utilizados como compensadores

	Ação de controle	$G(s) = \frac{\tilde{E}_o(s)}{E_i(s)}$	Circuitos com amplificadores operacionais
1	P	$\frac{R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1}$	
2	I	$\frac{R_4}{R_3} \frac{1}{R_1 C_2 s}$	
3	PD	$\frac{R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1} (R_1 C_1 s + 1)$	
4	PI	$\frac{R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1} \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2 C_2 s}$	
5	PID	$\frac{R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1} \frac{(R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_2 C_2 s}$	
6	Avanço ou atraso	$\frac{R_4}{R_3} \frac{R_2}{R_1} \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_2 C_2 s + 1}$	
7	Atraso-avanço	$\frac{R_6}{R_5} \frac{R_4}{R_3} \frac{[(R_1 + R_3) C_1 s + 1](R_2 C_2 s + 1)}{(R_1 C_1 s + 1)[(R_2 + R_4) C_2 s + 1]}$	

(Fonte: Ogata, 2003)

3.5 Modelagem do Controle Digital, Proteções, Sinalizações

3.5.1 Circuitos e DSC Utilizado para o Controle Digital

O bloco “controle digital, proteções e sinalizações (DSC)” mostrado na figura 36, é o bloco inteligente do gerador de ozônio e tem a função de controlar e monitorar todo o sistema, gerar os pulsos PWM para os conversores CC/CC, efetuar o fechamento da malha com ação PI para o conversor *buck*, limitar a corrente para o conversor *flyback*, monitorar o nível de tensão da rede elétrica, monitorar e controlar os níveis de temperatura, temporizar o relé de corrente *inrush*, realizar a partida suave do sistema e fornecer os sinais visuais e sonoros da condição atual do gerador de ozônio.

A escolha de um DSC se deve ao fato deste unir as características dos microcontroladores e DSP's em um único chip, dispensando desta forma, a utilização de plataformas de DSP para o controle digital, proteções e sinalizações, reduzindo consideravelmente o custo final do equipamento. A placa deve ser projetada conforme as necessidades do equipamento.

Para a correção do sinal PWM por meio da ação PI para o conversor *buck*, foi utilizada uma rotina fornecida pela Microchip, denominada *pid.s*, também utilizada em (Schiavon e Treviso, 2011).

A figura 69 apresenta o diagrama de blocos da placa de controle digital implementada, com suas respectivas sinalizações, proteções e alimentação.

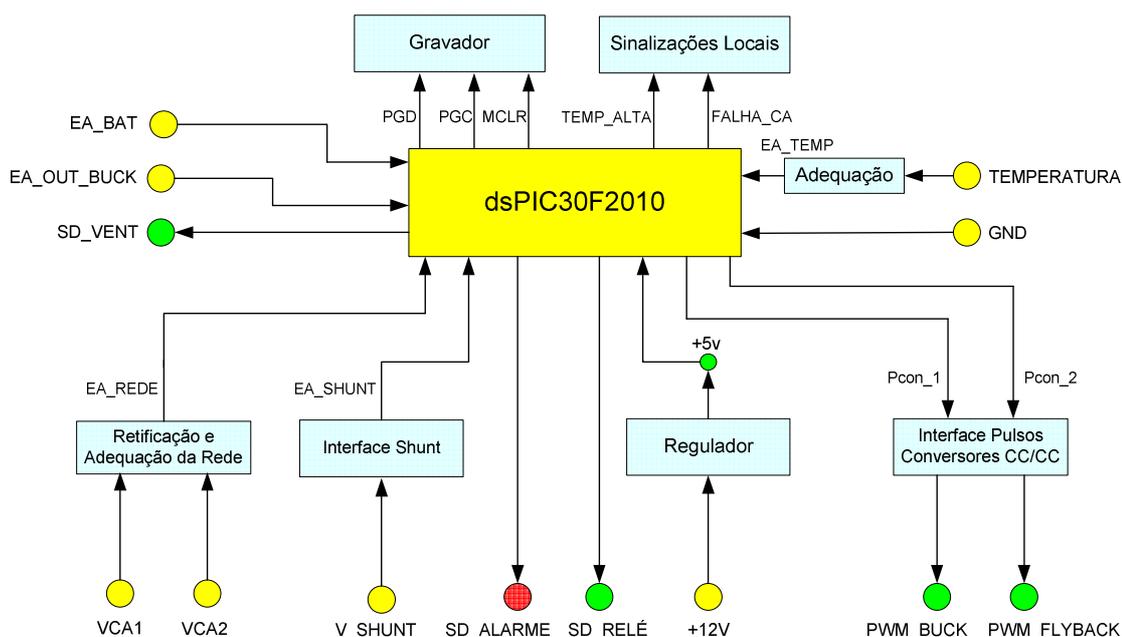


Figura 69. Diagrama de blocos da placa de controle digital

Como pode-se observar no diagrama de blocos da figura 69, o DSC utilizado foi o dsPIC30F2010 fabricado pela Microchip que é um DSC de 28 pinos que opera a 30 Mips, onde pode-se escolher ainda entre os modelos de encapsulamentos DIP e PLCC, neste projeto optou-se pelo modelo DIP devido a facilidade de construção da placa e flexibilidade na troca do chip em caso de defeito.

Ainda no diagrama de blocos da figura 69, pode-se observar que os sinais que entram na placa estão representados na cor amarela e possuem uma seta indicando esta entrada, já os sinais que são enviados pelo DSC (sinais de saída) estão representados na cor verde e possuem uma seta indicando este sentido, com exceção do sinal de alarme que está representado na cor vermelha devido à urgência desta sinalização.

A figura 70 apresenta o circuito completo do DSC indicando todos os sinais de entrada e saída.

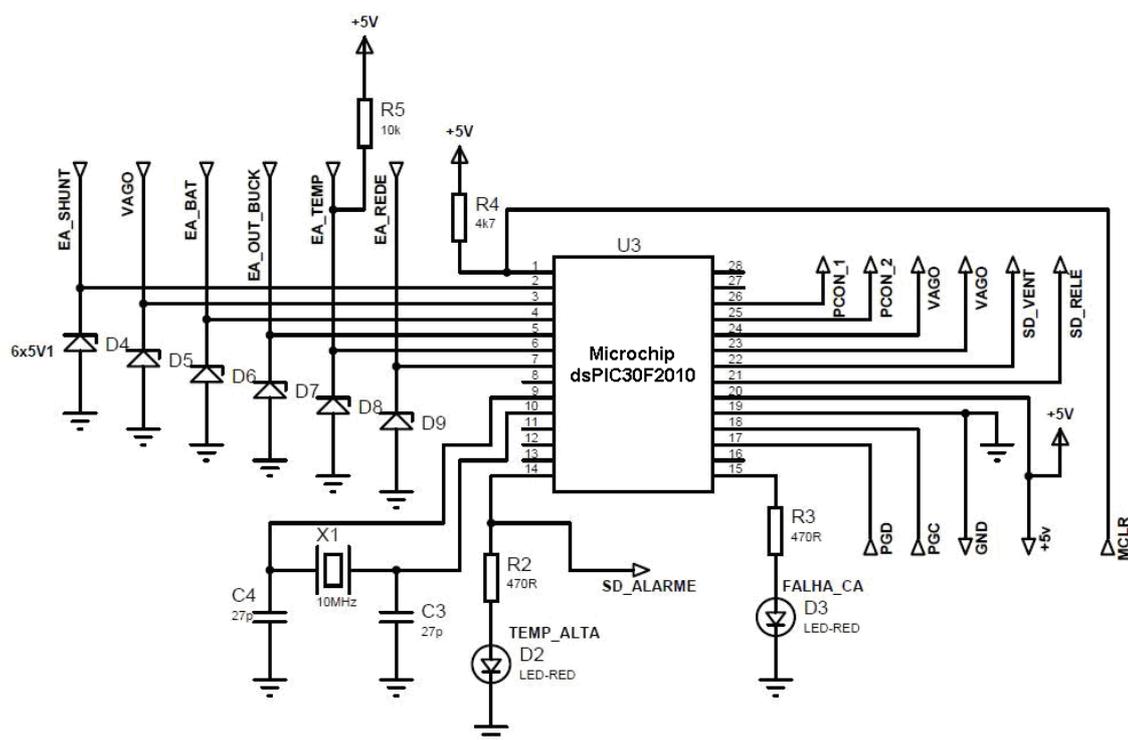


Figura 70. Circuito do DSC

Todos os blocos da figura 69 são descritos a seguir:

O bloco “sinalizações locais” é o responsável por sinalizar as condições da rede elétrica e bloquear os pulsos PWM por temperatura alta acionando o alarme nesta condição, como apresentado na figura 70.

O sinal de “temperatura” é proveniente de um sensor de temperatura NTC10k montado na placa de potência. Após adequação o sinal de temperatura (EA_TEMP) é responsável por duas ações, acionar um ventilador na placa de potência em um primeiro nível (50 °C) e bloquear os pulsos PWM dos conversores CC/CC em um segundo nível (60 °C), desligando o equipamento e acionando o sinal de alarme. O circuito do sensor de temperatura é mostrado na figura 71.

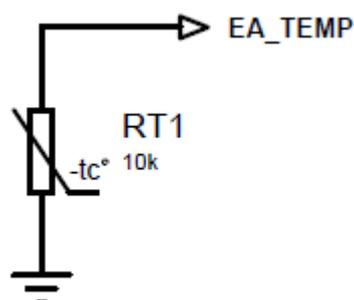


Figura 71. Circuito do sensor de temperatura

O sinal GND é o ponto comum (terra) para todos os potenciais da placa de controle digital.

O bloco “interface pulsos conversores CC/CC” recebe os sinais PWM enviados pelo DSC em 5 V (Pcon_1 e Pcon_2) e faz a amplificação destes pulsos para 12 V (PWM_BUCK e PWM_FLYBACK), utilizando amplificadores operacionais e estes últimos, acionam seus respectivos conversores. O circuito de amplificação dos pulsos PWM é mostrado na figura 72.

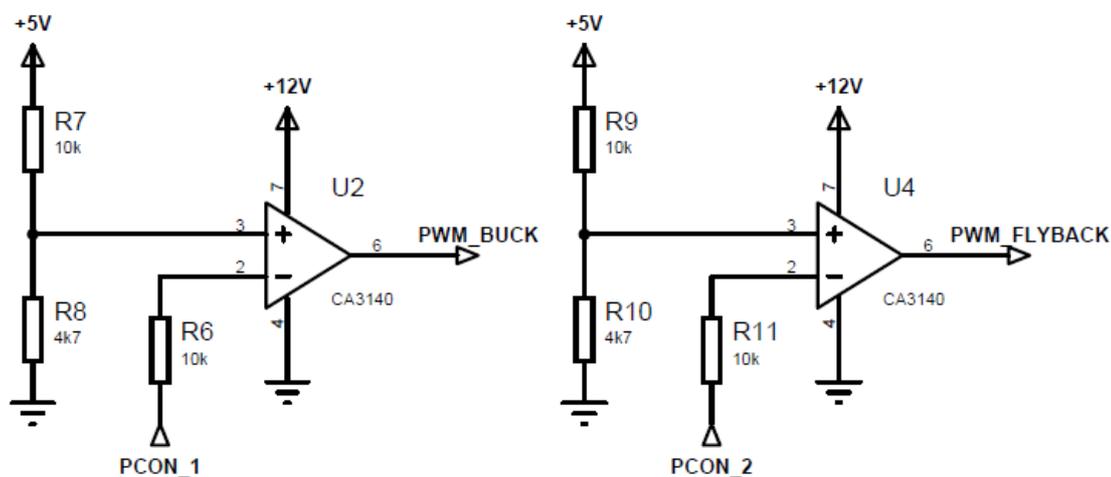


Figura 72. Circuito de amplificação do sinal PWM

O sinal +12 V passa pelo bloco “Regulador”, que é o responsável por gerar +5 V para alimentação do DSC e referência para comparações. Como o DSC e alguns circuitos de adequação necessitam de uma alimentação em 5 V e a placa de potência disponibiliza apenas um sinal de +12 V, houve a necessidade de implementação de um circuito na placa de controle digital, que rebaixasse este nível para tal valor, conforme mostrado na figura 69, para tanto foi utilizado um CI (circuito integrado) regulador de tensão muito comum da família 78XX, onde foi utilizado o CI7805. Em conjunto com este CI regulador de tensão foram adicionados capacitores antes e após a regulação para melhoria do sinal (diminuir os níveis de ruído) e também dois led’s indicando que as alimentações estão normais, sendo um led vermelho ligado ao 12 V e um led amarelo ligado ao 5 V, conforme ilustrado na figura 73.

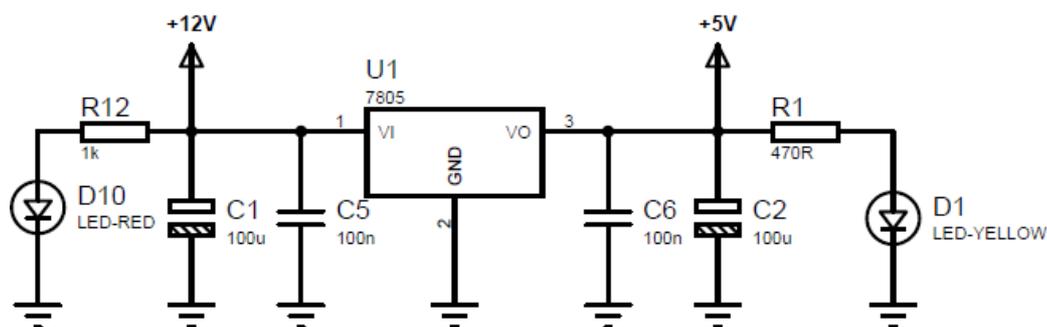


Figura 73. Circuito de adequação de nível

O sinal de saída “SD_RELÉ” é um sinal com amplitude +5 V proveniente de uma saída digital do DSC. Quando o sistema é iniciado, após 2 s, o DSC libera este sinal, que é responsável pelo acionamento do relé de limitação da corrente de partida via transistor, retirando o resistor de 47 Ω /5W do circuito. A figura 74 apresenta o circuito limitador da corrente de partida.

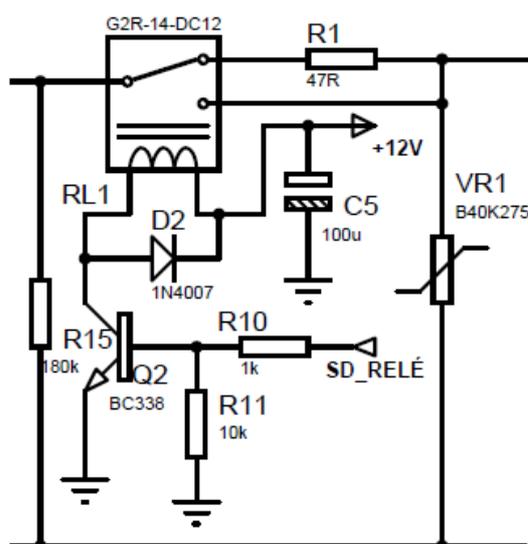


Figura 74. Circuito do limitador da corrente de partida

O sinal de saída “SD_ALARME” tem amplitude +5 V, é enviado para a placa de potência, onde aciona um *buzzer* (via transistor), responsável pela indicação sonora de bloqueio do equipamento por temperatura alta. A figura 75 apresenta o circuito de sinalização do alarme.

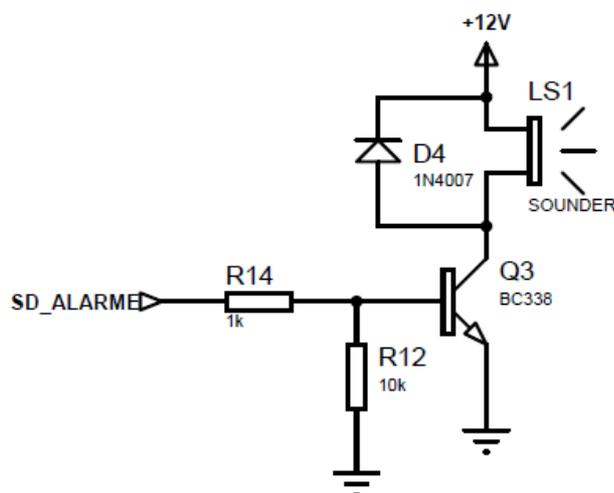


Figura 75. Circuito de sinalização do alarme

O bloco “interface shunt” recebe um sinal da ordem de mV (V_{SHUNT}) proveniente do resistor shunt montado no conversor *flyback* e realiza a amplificação deste sinal para os níveis de 0 a 5 V para a entrada analógica (EA_{SHUNT}) responsável pela limitação da corrente de entrada do conversor *flyback*, reduzindo a largura do pulso PWM do *flyback* em caso de sobrecorrente. A figura 76 apresenta o circuito amplificador shunt.

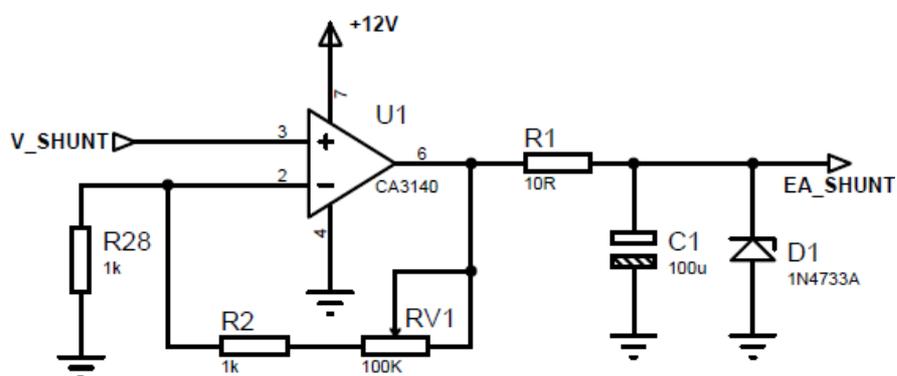


Figura 76. Circuito amplificador shunt

O bloco “retificação e adequação de rede”, recebe os sinais “VCA1 e VCA2” que correspondem a uma amostra da rede elétrica para monitoramento via DSC. Para tanto, foi projetado um circuito que gera de 0 à 5 V em sua saída (EA_{REDE}), quando alimentado por uma tensão de 0 à 300 Vca, proporcionalmente. Os níveis de sinalização para CA baixa e CA alta foram

ajustados em 90 Vca e 240 Vca, respectivamente. A figura 77 apresenta o circuito de monitoramento da rede elétrica.

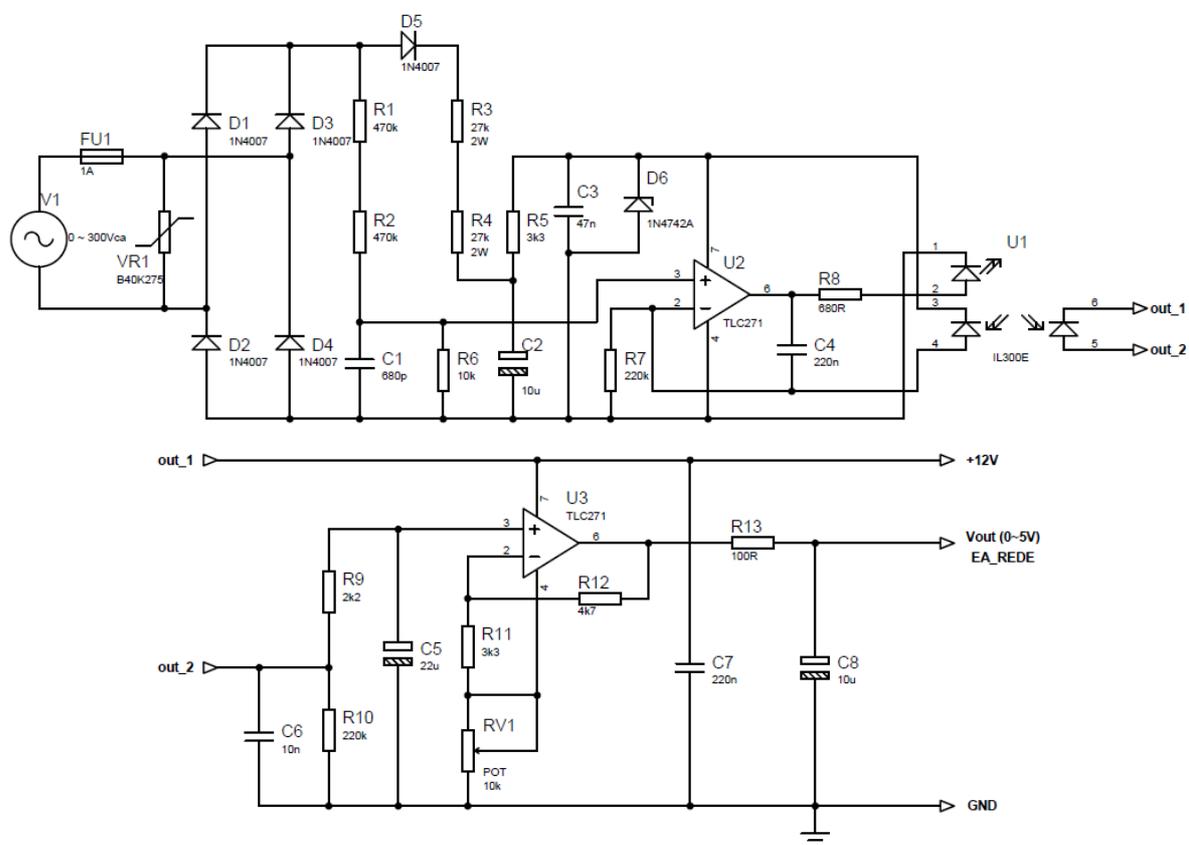


Figura 77. Circuito de monitoramento da rede CA

O sinal de saída “SD_VENT” é proveniente de uma saída digital do DSC, possui amplitude +5 V e tem a função de acionar um ventilador, via transistor, na ocorrência de temperatura alta, enquanto esta permanecer fora dos níveis normais. A figura 78 apresenta o circuito de acionamento do ventilador.

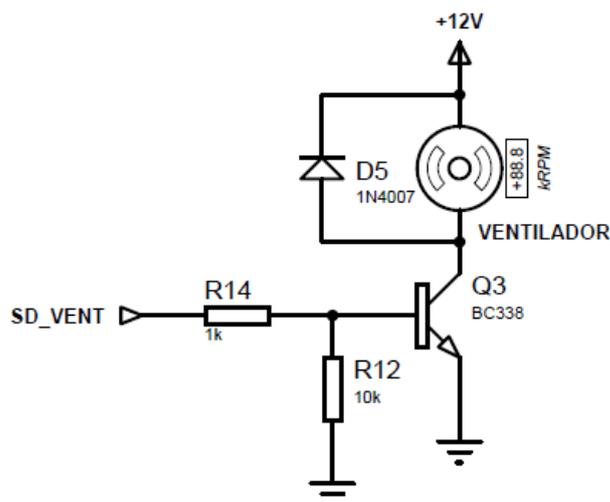


Figura 78. Esquema elétrico do acionamento do ventilador

O sinal de entrada “EA_OUT_BUCK” é um sinal de amostragem da tensão de saída do conversor *buck*, utilizado para fazer o fechamento da malha por tensão e conseqüentemente o controle automático da largura dos pulsos PWM do conversor *buck*, conforme mostrado na figura 79.

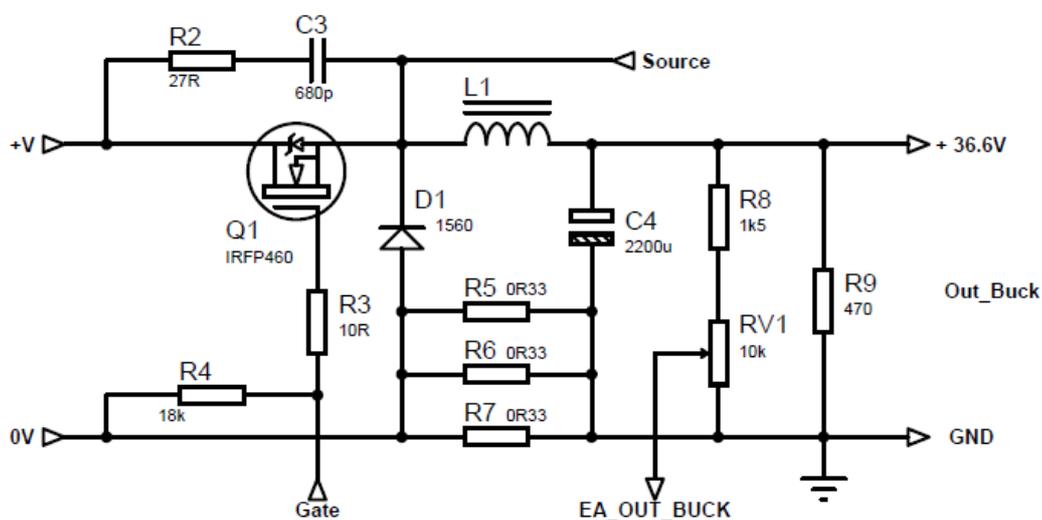


Figura 79. Conversor *buck* com sinal de realimentação

Por último tem-se o sinal de entrada “EA_BAT” que monitora o nível de tensão das baterias por meio de um circuito divisor de tensão resistivo, além de um conector para gravação *in-circuit* do DSC, por meio das entradas PGD, PGC E MCLR.

A figura 80 apresenta a estrutura utilizada para o cálculo dos compensadores no programa do DSC, fornecida pela empresa *Microchip*.

Operação

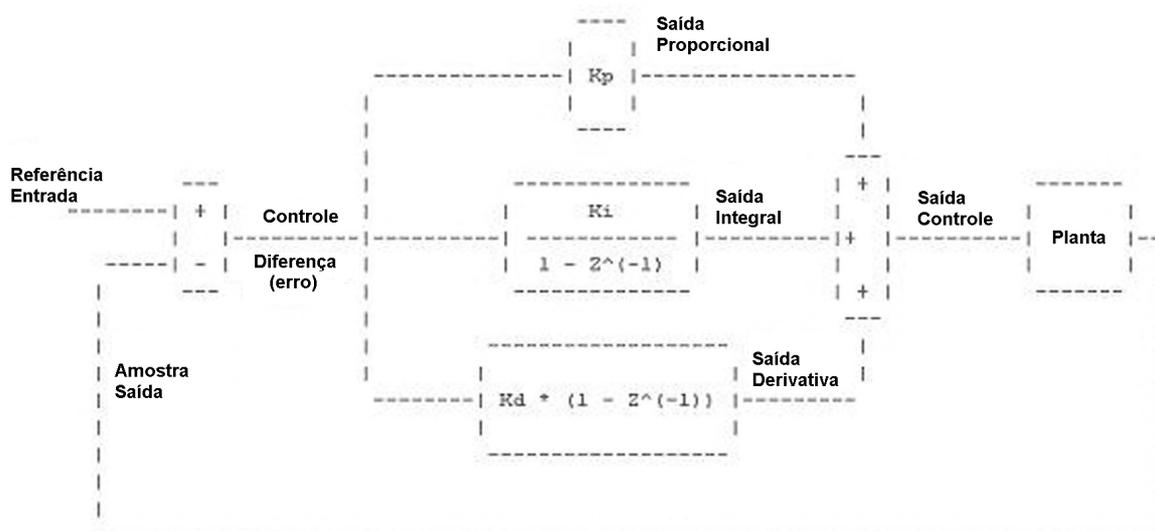


Figura 80. Estrutura utilizada para o cálculo dos compensadores no programa do DSC

3.5.2 Características do DSC Utilizado

A tabela 13 e figura 81 apresentam as principais características do dsPIC30F2010 e identificação dos pinos.

Tabela 13. Características do dsPIC30F2010
dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/ Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	I ² C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	–
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	–
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	–
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

(Fonte: *Datasheet dsPIC30F2010, Microchip, 2011*)

Pin Diagrams

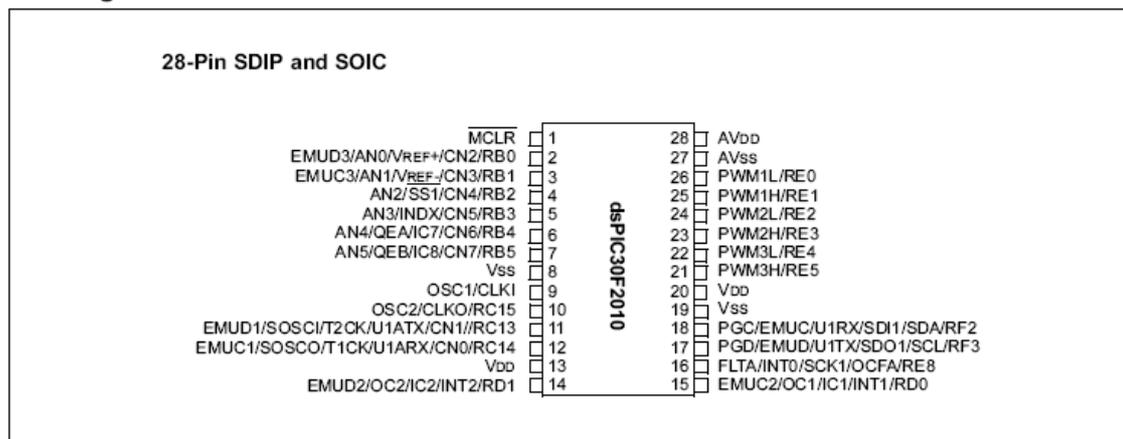


Figura 81. Pinos dsPIC30F2010 28-Pin SDIP
(Fonte: *Datasheet dsPIC30F2010, Microchip, 2011*)

3.6 Modelagem Conversor *Flyback*

Como visto anteriormente para o conversor *buck*, um indutor pode armazenar energia e que essa energia depende da corrente que passa pelo indutor. No conversor *buck*, a corrente de saída é fornecida como energia armazenada no indutor, e a cada ciclo (Ton-Toff) de chaveamento, a energia gasta durante o Toff é recolocada durante o Ton, supondo estável o estado da corrente de saída.

O princípio de funcionamento do conversor *flyback* baseia-se também no armazenamento de energia em um indutor. Essa energia é armazenada durante o Ton de um transistor, e durante o Toff, a energia é transferida à carga, na saída da fonte.

Os conversores *flyback* possuem o inconveniente da tensão de saída ter a polaridade oposta a da tensão de entrada. Se utilizar um transformador como elemento armazenador de energia, pode-se utilizar seu enrolamento secundário para obter isolamento elétrico entre a tensão de entrada e saída e solucionar este inconveniente.

3.6.1 Operação em Modo Contínuo

A figura 82 mostra o circuito e algumas formas de onda da característica da configuração *flyback* com transformador (padrão com saída CC) e no modo contínuo de funcionamento.

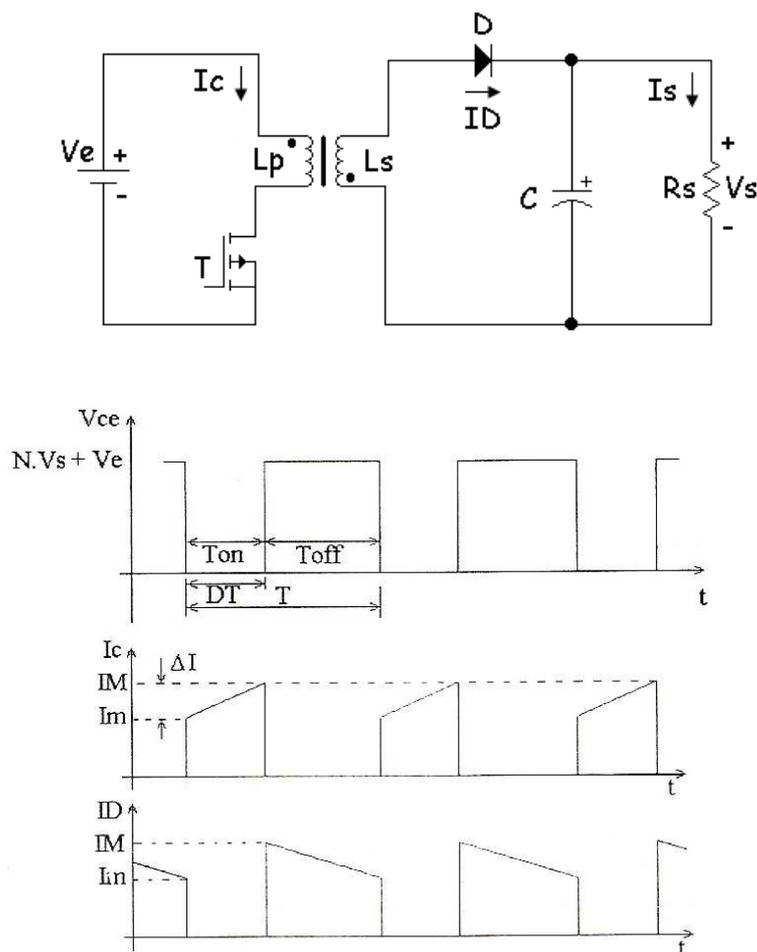


Figura 82. Circuito e formas de onda de um conversor *flyback* operando no modo contínuo e com transformador
(Fonte: Mello, 1988)

A seguir, apresenta-se o equacionamento para projeto de um conversor *flyback* conforme a esquema mostrado na figura 82.

Considerando estado estável (corrente constante na saída), quando o transistor T satura, a corrente armazenada no núcleo do transformador circula pelo transistor através do enrolamento primário do transformador. A corrente aumenta com inclinação V_e/L_p desde I_m até I_M . Assim pode-se escrever:

$$V_e = L_p \frac{IM - I_m}{DT} \quad (3.103)$$

Quando o transistor entra em corte, a energia armazenada no núcleo do transformador, no instante do corte é transferida para o enrolamento secundário, logo:

$$E_p = E_s \quad (3.104)$$

Sendo:

$$E_p = \frac{1}{2} L_p I M^2 \quad (3.105)$$

$$E_s = \frac{1}{2} L_s I D^2 \quad (3.106)$$

Igualando as equações 3.105 e 3.106, obtém-se:

$$\frac{L_p}{L_s} = N^2 \quad (3.107)$$

Onde,

$$N = \frac{ID}{IM} = \frac{N_p}{N_s} \quad (3.108)$$

A partir daí, a corrente no diodo descreve com inclinação $-V_s/L_s$ até a corrente $N \cdot I_m$. Sendo assim, tem-se:

$$V_s = L_s \frac{N(IM - I_m)}{(1-D)T} \quad (3.109)$$

Cancelando o termo $(IM - I_m)$, nas equações 3.103 e 3.109, obtém-se:

$$V_s = \frac{DVe}{N(1-D)} \quad (3.110)$$

A corrente fornecida pelo transformador à carga é igual a corrente média, que passa pelo diodo e pode ser calculada por:

$$I_s = \frac{N(IM + I_m)(1-D)}{2} \quad (3.111)$$

Assim as correntes IM e I_m são dadas por:

$$IM = \frac{I_s}{(1-D)N} + \frac{DVe}{2fL_p} \quad (3.112)$$

$$I_m = \frac{I_s}{(1-D)N} - \frac{DVe}{2fL_p} \quad (3.113)$$

As equações 3.112 e 3.113 servem para o dimensionamento do transistor quanto a corrente. O limite do modo contínuo se dá quando $I_m = 0$, e utilizando a equação 3.113, obtém-se o indutor L_p mínimo para a mínima corrente I_s . Assim:

$$L_p \geq \frac{N(1-D_{\min})D_{\min}V_{e_{\max}}}{2I_{s_{\min}}f} \quad (3.114)$$

A energia armazenada no núcleo é dada por:

$$E = \frac{1}{2}L_pIM^2 \quad (3.115)$$

Utilizando a equação 3.116, pode-se avaliar o tamanho do núcleo pelo A_p , e para compensar o enrolamento secundário deve-se usar $K_u = 0,25$.

$$A_p = \left(\frac{2E10^4}{K_uK_jB_{\max}} \right)^Z \quad (3.116)$$

Onde, K_u – fator de utilização das janelas do núcleo.
 K_j – coeficiente de densidade de corrente nos fios.
 $B_{m\acute{a}x}$ – densidade de fluxo (Tesla).
 E – energia máxima no indutor (Joule).
 $Z = 1/(1-x)$ – tabelado.

A corrente RMS no enrolamento primário pode ser calculada por:

$$I_{P_{RMS}} = \sqrt{\left[IM \text{ Im} + \frac{(IM - \text{Im})^2}{3} \right] D} \quad (3.117)$$

E a corrente no enrolamento secundário é:

$$I_{S_{RMS}} = N \sqrt{\left[IM \text{ Im} + \frac{(IM - \text{Im})^2}{3} \right] (1 - D)} \quad (3.118)$$

O valor do capacitor de saída deve ser estimado em funcao da ondulacao (*ripple*), e como a variacao pico a pico da tensão no capacitor depende da carga armazenada a cada ciclo, tem-se:

$$\Delta Q = \frac{DI_s}{f} \quad (3.119)$$

$$\Delta V_c = \frac{\Delta Q}{C} \quad (3.120)$$

$$\Delta V_c = \frac{DI_s}{fC} \quad (3.121)$$

Assim,

$$C = \frac{DI_s}{f\Delta V_c} \quad (3.122)$$

A ondulação total pico a pico no capacitor deve levar em conta a resistência série equivalente, sendo ΔV_c , na equação 3.122, apenas a parte da ondulação referente ao capacitor. A ondulação referente a RSE é dada por:

$$\Delta V_{RMS} = IMRSE \quad (3.123)$$

A ondulação total de saída será:

$$\Delta V_{st} = \Delta V_c + \Delta V_{RSE} \quad (3.124)$$

Se adotar $\Delta V_c \ll \Delta V_{RSE}$, tem-se $\Delta V_{st} \approx \Delta V_{RSE}$, o que leva a uma forma de ondulação na saída proporcional à corrente no capacitor. Neste caso, o capacitor deve ser calculado para ΔV s pelo menos 10 vezes menor que o requerido.

Outro parâmetro importante na escolha do capacitor é a corrente RMS que esse deve suportar quando em carga máxima. Essa corrente pode ser calculada por:

$$I_{c_{RMS}} = \sqrt{(1-D) \left[(IM - I_s)(Im - I_s) + \frac{(IM - Im)^2}{3} \right]} \quad (3.125)$$

Usando capacitores em paralelo, diminui-se a RSE e aumenta a capacidade de corrente máxima no capacitor equivalente, o que torna esse tipo de solução muito usada.

Para o conversor *flyback* adotou-se uma bobina automotiva como elemento magnético para elevação do nível de tensão aplicado ao reator. Optou-se por esta, pela facilidade de aquisição, garantia da qualidade quanto ao isolamento elétrico, fácil instalação, baixo custo e alta durabilidade, evitando assim, os problemas de produção e dificuldade de aquisição de materiais, como ferrite e outros. O fato da utilização de uma bobina automotiva também facilitou a

integração de um sistema fotovoltaico, devido ao baixo valor da tensão de entrada de operação desta.

A tabela 14 apresenta as especificações técnicas para o conversor *flyback*.

Tabela 14. Especificações técnicas para o conversor *flyback*

$V_{in} = 36.6 \text{ V}$	$F_{pwm} = 1 \text{ kHz}$	$V_{out} = 2.5 \text{ kVrms}$
$I_{in \text{ max}} = 1.5 \text{ A}$	$V_{ds} = 1 \text{ V}$	$I_{out \text{ max}} = 20 \text{ mA}$
Coil: Bosch F 000 ZS0 105		

A figura 83 apresenta o circuito completo para o conversor *flyback* desenvolvido.

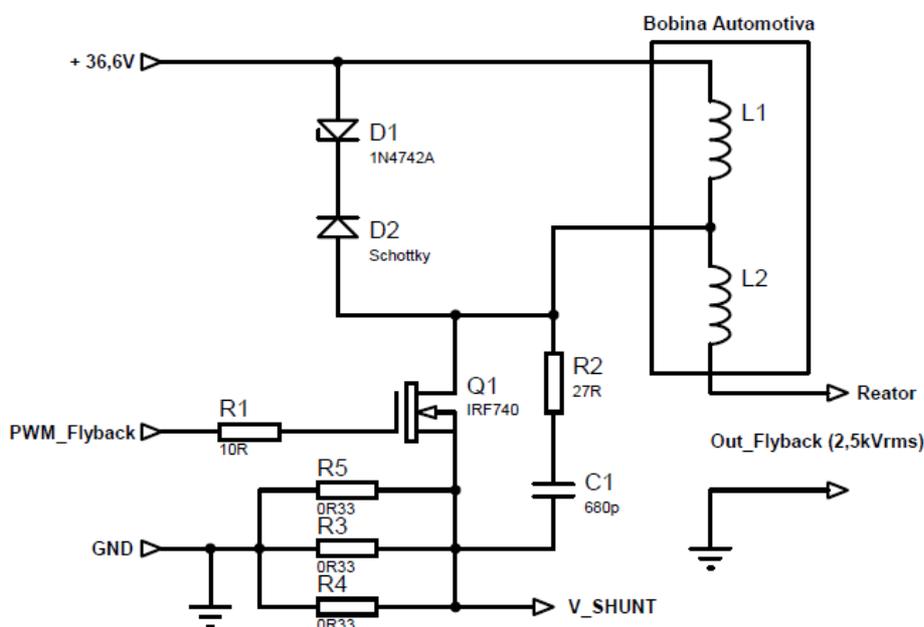


Figura 83. Circuito completo do conversor *flyback*

Observa-se na figura 83 que o conversor *flyback* não possui circuito de retificação e filtro em sua saída, pois sua tensão de saída possui um nível de 2,5 kVrms e frequência de 1 kHz, e é aplicada diretamente ao reator de ozônio para geração da descarga corona.

3.7 Circuitos Auxiliares

3.7.1 Circuito Retificador e Filtro de Entrada

O circuito retificador é formado por uma ponte de diodos, filtro de linha e limitador de corrente *inrush*. A tabela 15 apresenta as especificações técnicas para o circuito retificador.

Tabela 15. Especificações para o circuito retificador

Entrada	Saída
$F_{in} = 50/60 \text{ Hz}$	$I_{out_m\acute{a}x} = 500 \text{ mA}$
$V_{in_m\acute{i}n} = 90 \text{ Vrms}$	$V_{out_m\acute{i}n} = 127 \text{ V}$
$V_{in_m\acute{a}x} = 240 \text{ Vrms}$	$V_{out_m\acute{a}x} = 339 \text{ V}$

Utiliza-se um filtro RFI contendo resistores, capacitores e indutores. Os capacitores utilizados são do tipo X e Y destinados a supressão de interferências.

O circuito limitador de corrente *inrush*, na condição inicial (NF), inseri um resistor de $47\Omega/5W$ no circuito para limitação da corrente de partida. O comando temporizado do relé para retirada do resistor é enviado digitalmente pelo DSC após 2 segundos. A entrada está protegida por um fusível de 0,5 A. O circuito completo do retificador é apresentado na figura 84.

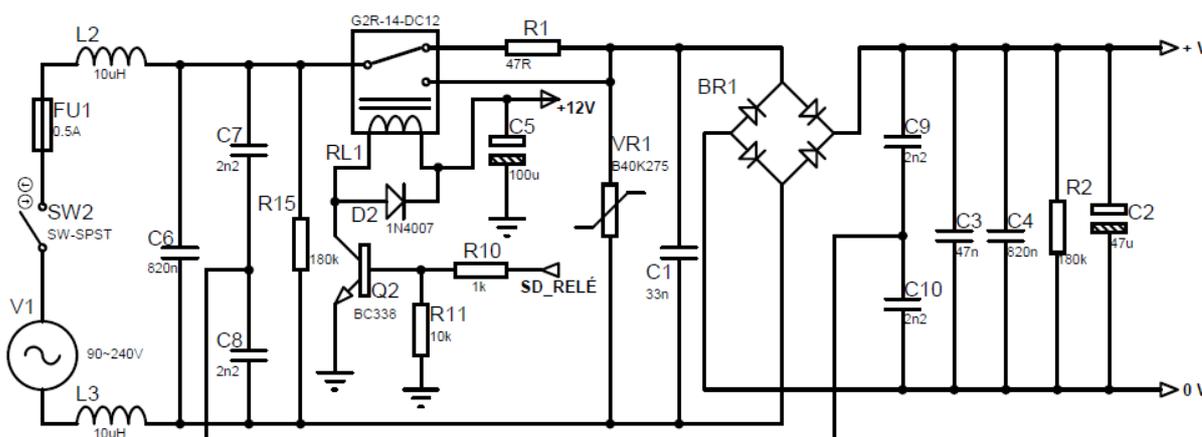


Figura 84. Circuito retificador completo

3.7.2 Conversor CA/CC

O bloco conversor CA/CC é uma fonte auxiliar chaveada em alta frequência de baixa potência, sendo esta em torno de 11 W, proposta em (*Chip-Rail*, 2009). Este conversor tem a função de fornecer a tensão de alimentação aos circuitos auxiliares e controle PWM digital, para o início do funcionamento dos conversores e manutenção destes. O conversor CA/CC auxiliar fornece uma tensão de 12 V e uma corrente máxima de 900 mA. A tabela 16 apresenta as especificações técnicas para o conversor CA/CC.

Tabela 16. Especificações para o conversor CA/CC

$F_{in} = 50/60 \text{ Hz}$	$I_{out_m\acute{a}x} = 900 \text{ mA}$
$V_{in_m\acute{i}n} = 90 \text{ Vrms}$	$V_{out_m\acute{i}n} = 12 \text{ V } \pm 5 \%$
$V_{in_m\acute{a}x} = 240 \text{ Vrms}$	$F_{pwm} = 60 \text{ kHz}$
$P_{out} = 11 \text{ W}$	$\eta > 87 \%$

O circuito completo do conversor CA/CC é apresentado na figura 85.

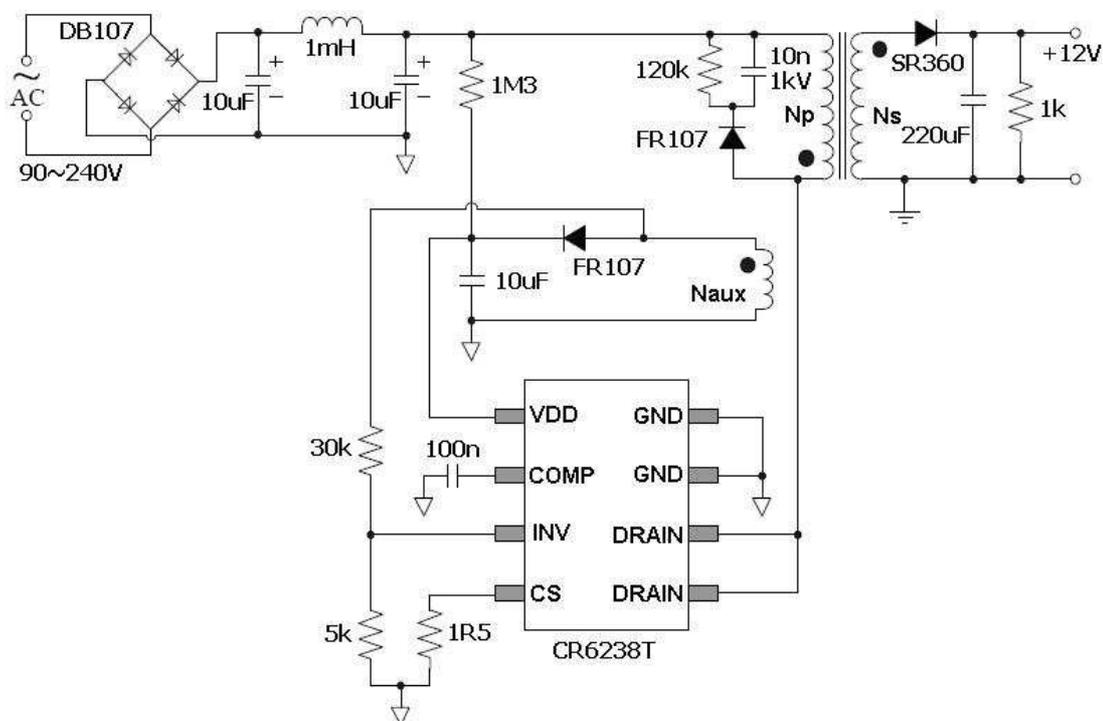


Figura 85. Circuito completo do conversor CA/CC

3.7.3 Drive para o Conversor *Buck*

O circuito *drive* possui a função de fornecer a tensão e corrente necessárias para colocar os *mosfets* em condução e no caso do conversor *buck*, isolar os pulsos PWM. A figura 86 apresenta o circuito completo do *drive* para o conversor *buck*.

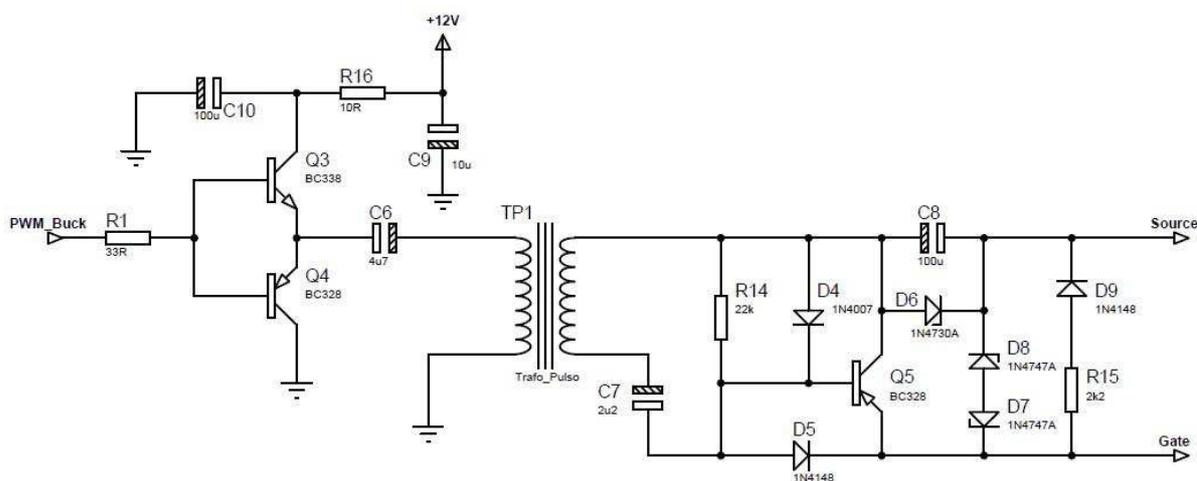


Figura 86. Circuito *drive* para o conversor *buck*

3.8 Acessórios: *Timer*, Botão Emergência, Lâmpadas

Com o objetivo de melhorar a performance e visualização das condições atuais do gerador de ozônio proposto, alguns acessórios foram implementados, tais como:

- *Timer*: Com a utilização de um *timer* acoplado ao sistema, é possível efetuar a programação desejada para que o gerador funcione automaticamente, ligando e desligando na hora programada pelo operador e nos dias programados, um exemplo de utilização deste é no caso de tratamento de água em piscinas onde é necessário o acionamento do sistema de filtragem por um determinado intervalo de tempo todos os dias. Com este sistema, elimina-se o trabalho de ligar e desligar a bomba todos os dias e ainda a aplicação de cloro na água, sabendo que o ozônio será injetado na água fazendo o trabalho do cloro. O *timer* utilizado é apresentado na figura 87.



Figura 87. *Timer* utilizado no gerador

- Botão de emergência: Ocorrendo qualquer anormalidade no sistema é possível interromper de forma instantânea a operação do equipamento por meio do botão de emergência, instalado na porta do gerador de ozônio e bloqueando todos os circuitos e máquinas em funcionamento. O botão de emergência quando acionado, gera uma sinalização local acendendo uma lâmpada vermelha indicando o bloqueio total do sistema.

- Lâmpadas: Conforme descrito anteriormente o gerador de ozônio proposto possui lâmpadas para sinalização do estado de funcionamento do gerador, uma vermelha indicando o bloqueio total do sistema pelo botão de emergência ou temperatura alta e uma verde indicando operação normal. Para os sistemas instalados com sistema de energia solar, existe ainda uma sinalização visual por led's do estado da carga da bateria, esta sinalização é fornecida pelo controlador de carga acoplado no sistema.

3.9 Instalação

Basicamente um sistema de tratamento com ozônio pode ser instalado de duas formas sendo, em linha injetado por um sistema venturi ou injetando o gás diretamente no líquido por meio de um compressor ou linha de ar comprimido. As figuras 88 e 89 mostram um sistema de tratamento básico com a utilização de um sistema venturi.

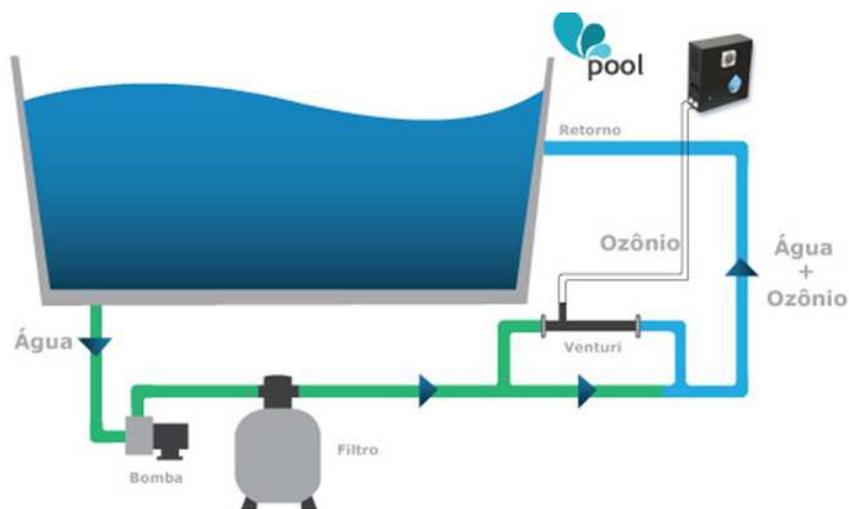


Figura 88. Sistema de tratamento por ozônio para piscinas



Figura 89. Detalhe da instalação do tubo venturi

Para os ensaios de laboratório foi projetado um sistema de tratamento com venturi para validação experimental do gerador, para isto foi confeccionada uma cuba de vidro temperado de espessura 8 mm e capacidade de 80 L, nela foi realizada toda instalação com tubulação de PVC de 40 mm juntamente com uma bomba utilizada em piscinas, na instalação foram previstos registros para controlar a vazão de líquido pelo venturi e conseqüente injeção do gás ozônio no líquido, e para esgotamento do reservatório.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados dos tratamentos realizados no arranjo mostrado na figura 90.



Figura 90. Instalação para ensaio de tratamento de efluente industrial

3.10 Equacionamento do Venturi

O medidor Venturi é um aparelho utilizado para medir vazões em tubulações sobre pressão. Ele foi idealizado pelo cientista italiano Venturi em 1791 e usado como medidor de vazão em 1886 por Clemens Herschel, sendo constituído por um bocal convergente/divergente, conforme mostra a figura 91:

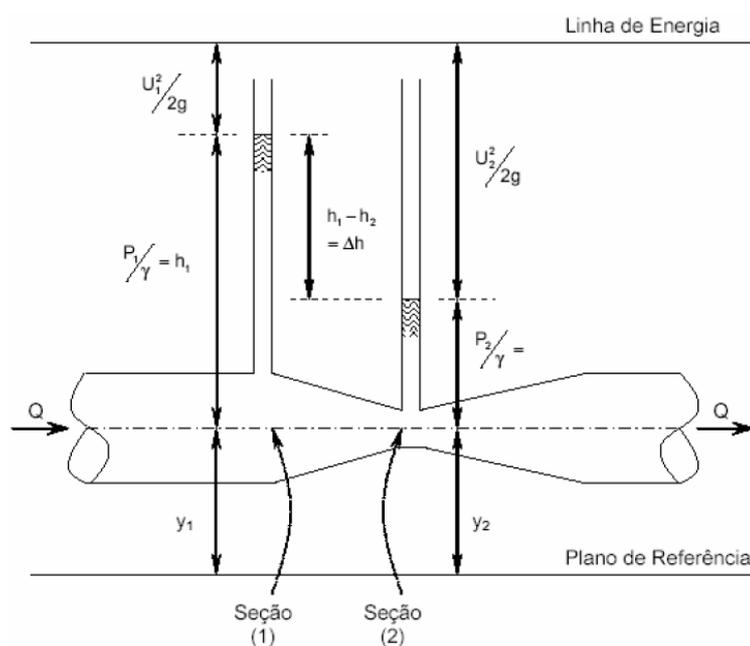


Figura 91. Tubo venturi
(Fonte: Armaroli, 2007)

O medidor Venturi é constituído de um tubo com seção a montante do mesmo diâmetro do conduto, por uma seção cônica convergente que conduz a uma seção mínima comprimida e a seguir, por uma seção cônica divergente que gradualmente retoma ao diâmetro original. Essa alteração de seção causa uma variação de velocidade e, por consequência, uma alteração de pressão. Pode-se então, calcular a vazão a partir da diferença de pressão encontrada.

A especificação de um medidor Venturi é feita pelos diâmetros do conduto e da seção comprimida, sendo que este último deve ser projetado para propiciar uma pressão (pressão mínima) maior que a pressão de vapor do fluido que escoar, evitando desta forma que o mesmo vaporize na temperatura do escoamento, o que caracterizaria o fenômeno denominado de cavitação.

A seguir é apresentado o equacionamento básico para o cálculo da vazão em um medidor Venturi.

3.10.1 Equacionamento Básico

Observando a figura 91 pode-se dizer que:

A - Área de seção transversal do conduto.

U - Velocidade média do escoamento.

p - Pressão.

h - Altura do líquido no piezômetro.

Considerando-se que a vazão é constante e que não existem perdas de carga no escoamento ao longo do trecho entre as seções 1 e 2, por meio da equação de Bernoulli pode-se escrever:

$$y_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \quad (3.126)$$

Como a tubulação está na horizontal, $y_1 = y_2$. Além disso, pela equação da continuidade tem-se que:

$$Q = A_i U_i \quad (3.127)$$

Logo:

$$Q = A_1 U_1 = A_2 U_2 \Rightarrow U_1 = U_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (3.128)$$

Substituindo-se U_1 em (3.126) e considerando-se que $\frac{p_i}{\gamma} = h_i$, tem-se:

$$h_1 + \frac{U_2^2}{2g} \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \Rightarrow$$

$$\frac{U_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = h_1 - h_2 \Rightarrow$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (3.129)$$

Assim, a vazão pode ser dada por:

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (3.130)$$

Porém, na realidade, a recuperação da pressão após a seção comprimida produz uma pequena perda de carga, geralmente compreendida entre 10 a 15 por cento da carga de pressão entre as seções (1) e (2). Desta forma, os valores reais de vazão são ligeiramente inferiores àqueles apresentados na equação

(3.130). Logo, para se determinar o valor real da vazão é necessário multiplicar a vazão determinada em (3.130) por um coeficiente atenuador chamado de coeficiente de descarga (C_d). Este coeficiente, a menos de informação específica, pode ser considerado aproximadamente igual a 0,99 para condutos grandes e 0,97 a 0,98 para condutos pequenos, isto sempre que o escoamento propiciar um número de Reynolds de aproximação grande ($Re > 10^5$).

Finalmente, a vazão em um medidor Venturi será dada por:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (3.131)$$

Para obter resultados precisos, o medidor Venturi deve ser precedido por um tubo reto, isento de singularidades, com um comprimento mínimo de 10 vezes o seu diâmetro maior (Armaroli, 2007).

3.11 Titulação pelo Método Iodométrico

Os ensaios de produção de ozônio foram realizados pelo método iodométrico, por meio de titulação indireta, segundo APHA (1998), método 2350 E, por ser um método aceito cientificamente (Rice et al, 1986), uma vez que os sensores eletrônicos possuem um custo muito alto.

O nome "titulação" vem da palavra francesa *titration* que significa "ensaio". É um método de análise volumétrica, na qual se adiciona lentamente o volume de um reagente (substância a ser titulada) a outro reagente padrão, de volume e concentração conhecidos (substância titulante) (Rossetti, 2007).

Conhecendo-se qual a quantidade da solução padrão necessária para reagir totalmente com a amostra e a reação química que ocorre entre estas espécies, pode-se calcular a concentração da substância a ser titulada (Silva, 2007).

Neste trabalho, a titulação foi realizada pelo método iodométrico cujo princípio é apresentado a seguir.

Na absorção do ozônio (O_3) quando em contato com a Solução de iodeto de potássio (KI), há a formação de iodato de potássio (KIO_3). Na sequência, é feita a adição de um reagente auxiliar conhecido como indicador (amido) em um meio neutro ou moderadamente acidulado com ácido sulfúrico (H_2SO_4). Assim, o amido reage com o iodeto e, na presença de um redutor (solução padronizada de tiosulfato de sódio) forma-se um complexo azul escuro (Silva, 2007).

Os reagentes utilizados para a determinação de ozônio foram todos preparados no laboratório onde o ensaio ocorreu. São estes:

Solução 1: Tiosulfato de sódio

- 25 g de tiosulfato de sódio (0,0983N) em 1000 mL de água fervida e resfriada.
- Adicionar 0,01 g de iodeto de mercúrio II (HgI_2).
- Adicionar 0,2 g de carbonato de sódio ($NaCO_3$).

Solução 2: Amido solúvel

- 2 g de amido solúvel em 225 g de água destilada.
- Ferver por 7 minutos, resfriar e armazenar em recipiente de plástico ou vidro.

Solução 3: Ácido sulfúrico

- H_2SO_4 1 M.
- 13,8 mL ou 24,52 g de H_2SO_4 , completar até 250 mL com água destilada.

Solução 4: Iodeto de potássio

- 20 g de iodeto de potássio para cada 1000 mL de água destilada.

Obs.: Realizar ensaios em duplicata com cada vazão requerida, se os resultados obtidos forem muito diferentes, realizar um terceiro ensaio.

3.11.1 Ensaio de Produção

Para realização dos ensaios de produção de ozônio do gerador, seguiram-se os seguintes passos:

- 1- Ajustar a vazão de oxigênio ou ar alimentador conforme necessidade;
- 2 - Ligar o gerador de ozônio e deixar estabilizar a produção de O₃ (20 s);
- 3 - Borbulhar o ozônio em uma solução de iodeto de potássio de 500 mL por 1,5 minutos. Após o borbulhamento, a solução de KI que era transparente, ficará com uma coloração alaranjada;
- 4 - Adicionar 8 mL da solução de ácido sulfúrico;
- 5 - Titular a amostra com a solução de tiosulfato de sódio até que a solução adquira uma coloração amarelo claro (palha);
- 6 - Adicionar 4 mL da solução de amido solúvel, a solução ficará com uma coloração azul escuro;
- 7 - Titular com a solução de tiosulfato de sódio até que a coloração azul desapareça e a solução fique transparente, anote o volume de tiosulfato de sódio consumido;
- 8 - Substituir os dados na equação dada abaixo e calcular a concentração de ozônio produzida pelo gerador de ozônio em testes.

$$P(g/h) = \frac{N_{tio} V_{tio} V_{KI} 1440}{t V_{AM}} \quad (3.132)$$

$$P\left(\frac{g}{\min}\right) = \frac{N_{tio} V_{tio} V_{KI} 24}{t V_{am}} \quad (3.133)$$

Em que:

P = Produção de ozônio.

N_{tio} = Normalidade do tiosulfato de sódio (N).

t = Tempo de contato (min).

V_{tio} = Volume consumido de tiosulfato de sódio (mL).

V_{AM} = Volume da amostra a ser titulada (mL).

V_{KI} = Volume da solução de iodeto de potássio (mL).

1440 = Fator de correção das unidades.

24 = Fator de correção das unidades.

As figuras de 92 a 99 apresentam todo o procedimento de titulação iodométrica, passo a passo.



Figura 92. Solução de KI antes do borbulhamento com O₃



Figura 93. Solução de KI 2% sendo ozonizada



Figura 94. Solução de KI 2% ozonizada



Figura 95. Fervendo a solução de amido por 7 minutos



Figura 96. Solução de KI 2% ozonizada sendo titulada com tiosulfato de sódio até atingir a coloração amarela palha, já com H_2SO_4



Figura 97. Adicionando amido na solução, após atingir a coloração amarela palha



Figura 98. Titulando com tiosulfato após adição do amido



Figura 99. Solução ao final da titulação

Este procedimento foi realizado com diferentes vazões de oxigênio, conforme resultados de titulação. A partir do volume de tiosulfato de sódio gasto na titulação da solução de KI ozonizada, para cada uma das diferentes vazões, foi possível quantificar a produção de ozônio gerada pelo equipamento em um tempo definido de 1,5 minutos, com base na equação 3.132.

Os resultados obtidos para diferentes vazões são apresentados no capítulo 4.

3.11.2 Materiais Utilizados

A seguir é apresentada uma lista de materiais e reagentes necessários para realização dos ensaios de titulação pelo método iodométrico.

- Vidraria:

1 *Erlenmeyer* 1000 ml.

1 Copo *béquer* de 2000 mL.

1 Copo *béquer* de 50 mL.

1 Copo *béquer* de 250 mL.

1 Bureta de 50 mL torneira *teflon*.

1 Base para bureta com haste.

1 Pinça para bureta com mufa.

1 Pipeta sorológica graduada 10 ml.

1 *Pissete* 500 mL.

2 Frascos de 1000 mL com tampa para armazenar os reagentes.

2 Frascos de 500 mL com tampa para armazenar os reagentes.

- Reagentes:

200 g de Iodeto de Potássio (frascos de 100 g).

1000 g de Tiosulfato de Sódio (frasco de 1000 g).

500 mL de Ácido Sulfúrico (frasco de 0,5 L).

500 g de Amido Solúvel (frasco de 500 g).

20 L de Água destilada.

- Outros:

Balança digital de precisão.

Fluxômetro de ar comprimido de 0 a 15 L/min.

Mangueiras e conexões.

Aquecedor elétrico e compressor de ar.

3.12 Sistema de Energia Solar

O crescimento da população mundial, associado ao desenvolvimento tecnológico e industrial, conduz a um grande aumento da demanda energética. Muitas das fontes de energia utilizadas atualmente têm volumes limitados e poderão se esgotar em um horizonte de algumas décadas. A disponibilidade de energia não mais corresponde à demanda imposta pela estrutura espacial da vida urbana, o que implica num período de adaptação. Estamos entrando num período de redução de possibilidades energéticas, principalmente das originadas do petróleo, que é hoje, uma fonte de energia polivalente; e as fontes de energia nucleares, geotérmicas, solares, biomassa e outras, que substituirão as atuais, deverão, nas próximas décadas, ajustar-se as necessidades de utilizações, para que não venham a causar problemas ambientais (Knijnik, 1994).

Dados da Eletrobrás (2001) relatam que as reservas de combustíveis fósseis de boa qualidade no Brasil não são grandes e que as reservas de petróleo são avaliadas como suficientes para 22 anos. O potencial hidrelétrico do Brasil, do qual somente 23% é aproveitado, tem sua maior capacidade na região amazônica, onde a inundação de enormes áreas para a construção de reservatórios das hidrelétricas poderia trazer como resultado uma catástrofe ambiental.

Neste contexto faz-se necessário buscar novas alternativas para geração de energia. Uma destas alternativas é a utilização da energia solar. A radiação solar chega a nosso planeta de forma abundante e pode ser considerada uma fonte inesgotável. Estima-se que o tempo necessário para que incida sobre a terra, uma quantidade de energia solar equivalente à demanda energética mundial anual, seja de aproximadamente 12 minutos. Em três semanas, a energia

solar incidente sobre a terra equivale também a todas as reservas conhecidas de combustíveis fósseis como óleo, gás natural e carvão (Rüther, 2000).

A cada dia novas pesquisas vêm apresentando diferentes tecnologias para utilização e aproveitamento desta fonte de energia, já tornando sua aplicação uma realidade em muitos países. A energia solar fotovoltaica tem provido energia elétrica para qualquer aplicação e em qualquer localização na terra e no espaço, sendo que o meio urbano começou a se destacar como um grande absorvedor desta tecnologia ecológica.

3.12.1 Tecnologia Fotovoltaica

A tecnologia fotovoltaica é vista por muitos, como um caminho ideal para a geração de energia, por meio de uma fonte inesgotável e não poluente. É um método de produção de energia sustentável e amigável ao meio ambiente, trazendo benefícios tanto ambientais quanto energéticos. Atualmente, existem no mercado várias tecnologias fotovoltaicas, baseadas em diferentes elementos.

Em termos de aplicações terrestres destacam-se as células solares de silício cristalino (c-Si), o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio. Neste último grupo, segundo Ruther (2000), aparecem elementos altamente tóxicos e raros. Este fator fez com que surja um obstáculo considerável na utilização mais acentuada destas tecnologias em alguns países.

Dentre os modelos mencionados, os que possuem maior utilização são os painéis de silício cristalino e os de silício amorfo.

A tecnologia de filmes finos vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente na integração com o entorno construído, por apresentar uma grande diversidade de modelos e também devido ao baixo custo de produção. Hoje, estão disponíveis no mercado painéis flexíveis, mais leves e resistentes, semitransparentes, ou até mesmo com superfícies curvas, que podem substituir elementos de revestimento na edificação.

Estudos já realizados relatam que devido a excelente performance que os painéis de a-Si têm demonstrado, estes são uma boa escolha de tecnologia para

rede-conectada, integração com a edificação e utilização em climas quentes como no Brasil (Ruther, 2000).

3.12.2 Dimensionamento de Sistemas Solares

A princípio é só fazer uma relação de todos os equipamentos, luzes, etc., que pretende ligar ao sistema, verifique o consumo em Watts e a quantidade de horas que cada um ficará ligado por dia. Multiplique os valores de consumo pelas horas de uso. Some os resultados e obtenha o consumo diário de energia. Quando se tratar de consumo não regular, tais como residências de final de semana, é preferível trabalhar com valores de consumo, considerando os dias que não haverá consumo, mas há geração e isso deve ser compensado com o armazenamento em baterias.

- Cálculo da energia diária consumida em Ah:

Para o cálculo da energia diária consumida, deve-se fazer uma somatória das energias de cada consumidor que será ligado ao sistema, conforme equação abaixo:

$$E_C = \sum \left[\left(\frac{P_i n}{12} \right) t_i \right] \quad (3.134)$$

Onde:

E_C – Energia diária consumida [Ah].

P_i – Potência consumida por cada carga [W].

n – Quantidade de cargas com o mesmo consumo e tempo de uso.

t_i – Tempo de uso diário [h].

12 – Tensão nominal das baterias [V].

Após o cálculo de E_C , aplica-se o fator de correção de 30% devido a recarga de baterias, perda de rendimento do painel, temperaturas elevadas, poeiras e envelhecimento, desta forma:

$$E_{CC} = E_C + 30\% \quad (3.135)$$

onde, E_{CC} é a energia consumida corrigida.

- Cálculo dos painéis solares necessários:

Determinando a corrente a ser fornecida pelo painel (i_P), considerando insolação de 5000 W/m^2 , durante 5 horas por dia.

$$i_P = \frac{E_{CC}}{5} \quad (3.136)$$

i_P é a corrente mínima que os painéis devem fornecer.

- Controlador de carga:

O controlador de carga é definido pela tensão de trabalho dos módulos e corrente. A sua capacidade deve superar a corrente total dos painéis a serem conectados. Caso a corrente supere o valor do controlador, deve ser considerada a possibilidade de dividir a instalação por mais controladores e baterias.

- Cálculo das baterias necessárias:

Para a determinação do banco de baterias, será considerada uma profundidade de descarga de 70% e uma determinada autonomia em dias, podendo ficar sem sol por este período com funcionamento garantido.

$$Cap = \left(\frac{E_C 1,1}{0,7} \right) A \quad (3.137)$$

Onde,

Cap – Capacidade mínima do banco de baterias [Ah];

A – Autonomia [dias]

- Quantidade e potência dos painéis:

Os painéis fotovoltaicos devem ser escolhidos de acordo com a corrente fornecida por cada um, onde a somatória das correntes deve ser superior a i_P calculada, para isto um catálogo de painéis deve ser consultado.

Quando for necessário o fornecimento de corrente alternada, deve-se adicionar um inversor de tensão ao sistema, com capacidade de acordo com o consumo das cargas em CA. A figura 100 apresenta um sistema básico de energia solar

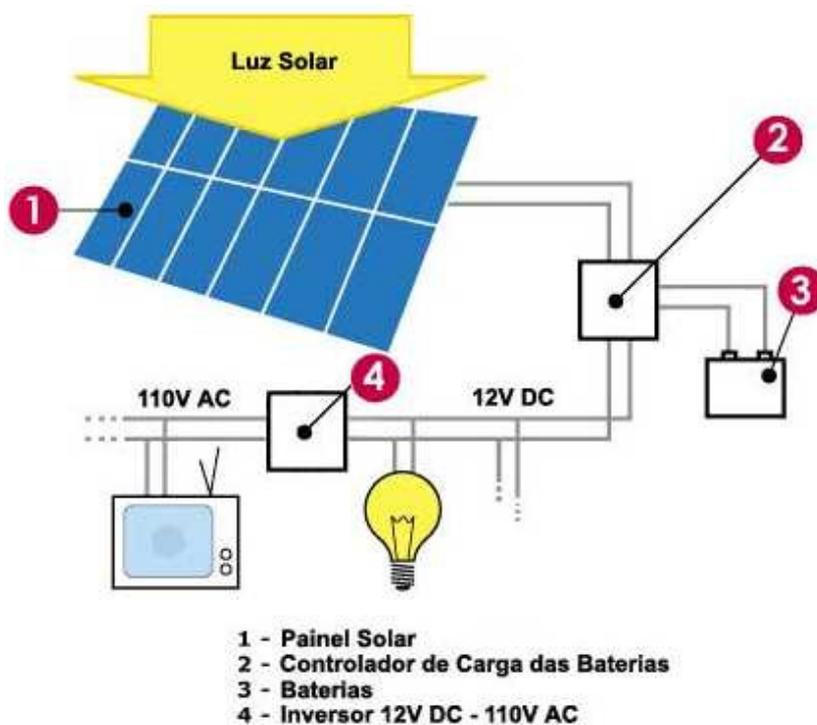


Figura 100. Sistema de energia solar

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES – GERADOR DE OZÔNIO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos experimentalmente para os geradores de ozônio desenvolvidos durante a pesquisa, tais como gerador operando com fonte convencional, gerador operando em alta frequência com controle analógico e gerador operando em alta frequência com controle digital. Para os geradores operando em alta frequência serão apresentados os resultados dos circuitos separadamente, tais como, conversores *buck* e *flyback*, controle digital por DSC, circuitos auxiliares e concentração de ozônio na saída do reator, quantificada pelo método de titulação iodométrica.

4.1 Resultados para o Gerador com Fonte Convencional

Conforme mencionado no capítulo 1, nos objetivos específicos, foi desenvolvido um gerador de ozônio com fonte convencional (figura 37), operando em baixa frequência, apenas para validação do reator desenvolvido, sem qualquer tipo de controle em malha fechada ou monitoramento. Para tanto, foi montado um circuito retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo, alimentado por um transformador de 24V/5A. A saída desta fonte convencional foi utilizada para alimentar o conversor *flyback* operando com uma bobina automotiva. Por este motivo, a fonte convencional não foi submetida a ensaios de regulação estática, dinâmica, *ripple* entre outros.

Para a parte de controle de chaveamento do conversor *flyback* foi utilizado um circuito oscilador operando no modo astável, montado com um circuito integrado 555 operando em uma frequência de 764,5 Hz. Para alimentação do circuito de controle, foi utilizado um regulador de tensão 7812. Os diagramas das etapas de potência e controle, são apresentados nos anexos 1 e 2, respectivamente.

A tensão medida na saída da fonte convencional foi de 34 V com baixo nível de ruído devido à etapa de filtragem de saída, conforme apresentado na figura 101.



Figura 101. Sinal de saída da fonte convencional

A figura 102 apresenta o sinal de saída do circuito estável, ou seja, uma onda quadrada com frequência de 764,5 Hz e 12 V de amplitude, utilizada para acionar o FET do conversor *flyback*.

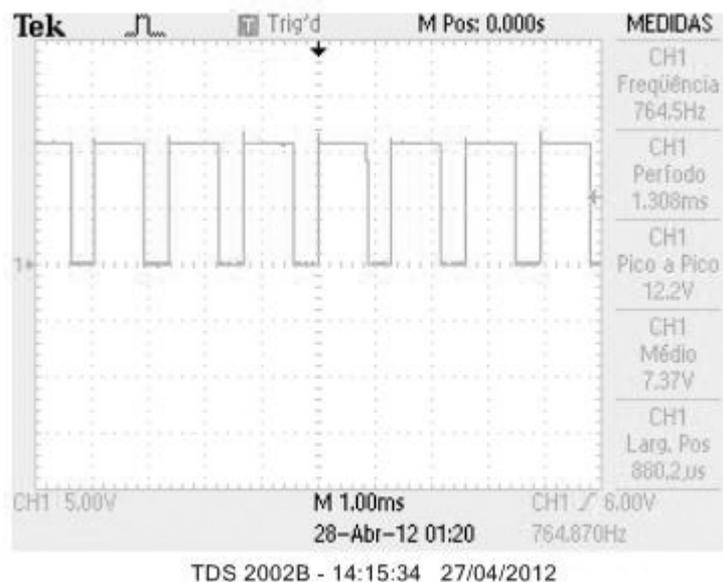


Figura 102. Sinal de saída do circuito estável

Uma amostra do sinal de alta tensão da saída do conversor *flyback*, e que é aplicada ao reator para descarga corona, é apresentada na figura 103. O valor eficaz medido, gira em torno de 2,3 kV.

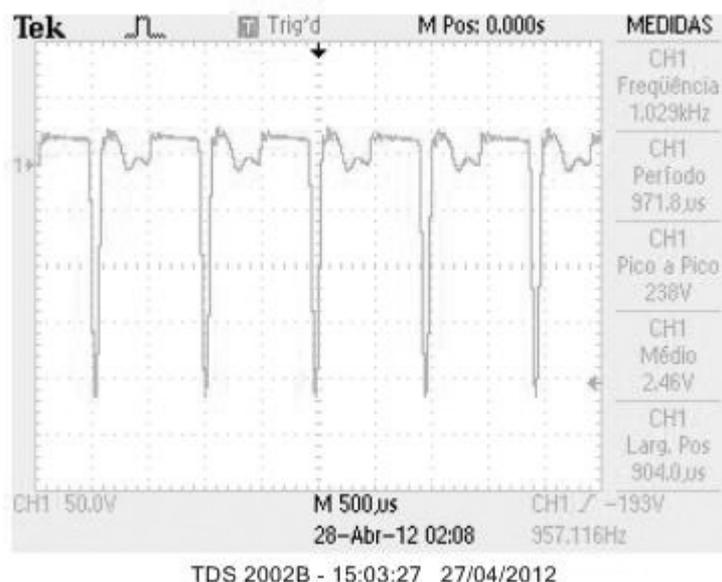


Figura 103. Amostra do sinal de saída do conversor *flyback*, alimentado com fonte convencional

Por meio deste sistema, simples e eficaz, porém sem controle, proteções e sinalizações, foi possível analisar o desempenho e a eficácia do reator desenvolvido, mostrando que a geometria cilíndrica adotada e suas dimensões, são uma ótima opção para geração de ozônio por descarga corona, viabilizando a continuidade da pesquisa e o desenvolvimento de circuitos de controle, proteções e sinalizações, analógicos e digitais, com objetivo de obter uma produção de ozônio estável, em diferentes concentrações, ajustada eletronicamente, que as variações de entrada não sejam refletidas na saída e as variações de saída sejam compensadas automaticamente. O fator de potência medido por meio de um instrumento Fluke 43B foi de 0,79.

4.2 Resultados para o Gerador em Alta Frequência com Controle Analógico

A partir do reator validado, iniciou-se o desenvolvimento de uma fonte chaveada em alta frequência, por seu baixo volume, nível de ruído, controle em malha fechada, potência, possibilidade de variação da tensão de saída por meio do sinal de controle PWM, faixa larga de tensão de entrada possibilitando a alimentação em 127 ou 220 Vrms sem a necessidade de chave seletora,

proteções, sinalizações, possibilidade de bloqueio por meio do corte do sinal de controle PWM em condições críticas, tais como temperatura alta, entre outros.

Optou-se pelo desenvolvimento de um circuito retificador em onda completa em ponte, seguido de filtro capacitivo e um conversor abaixador de tensão do tipo *buck*. Para o circuito de controle PWM, utilizou-se um circuito integrado dedicado para este tipo de controle, o CI SG3524 operando com uma frequência de 24 kHz, com fechamento da malha de saída por tensão com ação proporcional e integral (PI).

Para o conversor *flyback*, manteve-se o circuito com bobina automotiva, utilizando um CI PWM SG3524 operando com uma frequência de 1 kHz, em malha aberta, devido ao alto valor de tensão na saída. Os diagramas eletrônicos completos das etapas de potência e controle analógico, são apresentados nos anexos 3 e 5, respectivamente.

A figura 104 apresenta a tensão de saída do conversor *buck* com circuito de controle analógico, utilizando o CI dedicado, a qual se manteve constante quando alimentado em 127 e em 220 Vrms, devido controle em malha fechada. O nível de tensão ajustado foi de 36,65 V.



Figura 104. Sinal de saída do conversor *buck* com controle analógico

As figuras 105 e 106 apresentam o sinal de controle PWM para o conversor *buck* quando alimentado em 127 e 220 Vrms, respectivamente. Fica

evidente, por meio da largura dos pulsos, a ação e eficácia do controle automático no sinal PWM.

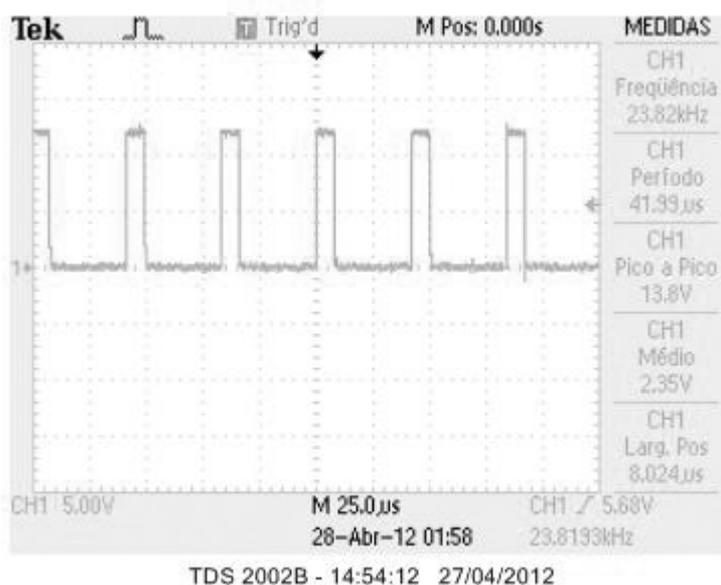


Figura 105. Sinal PWM analógico para o conversor *buck* alimentado em 127 V

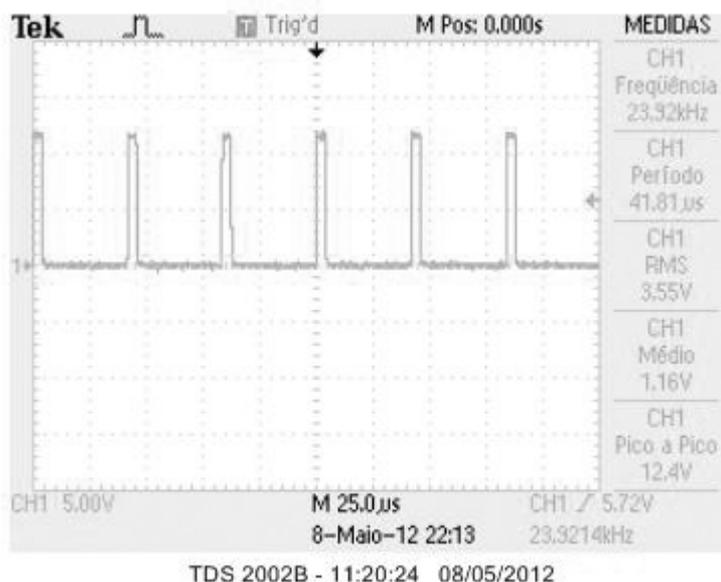


Figura 106. Sinal PWM analógico para o conversor *buck* alimentado em 220 V

Na figura 107 é apresentado o sinal de controle PWM para o conversor *flyback*, gerado de forma analógica por meio do CI dedicado. Para facilitar o ajuste da tensão de saída do conversor *flyback*, foi inserido no circuito de controle analógico, um potenciômetro para variar a largura dos pulsos PWM, uma vez que este foi implementado em malha aberta.

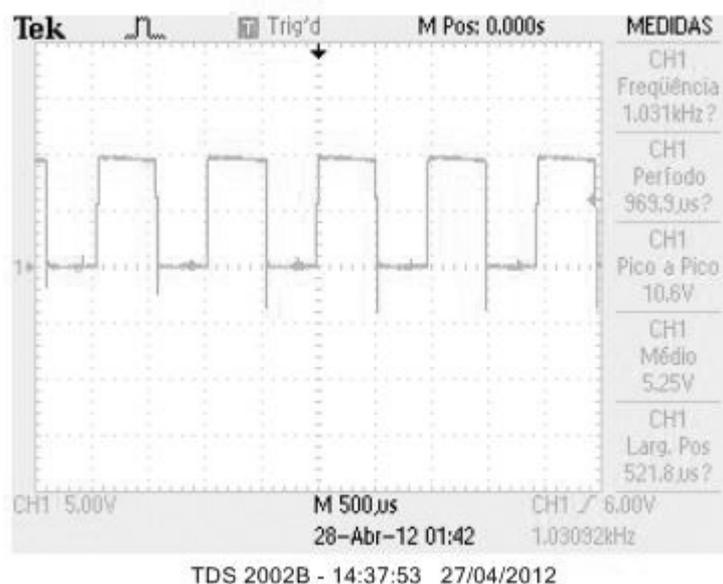


Figura 107. Sinal PWM analógico para o conversor *flyback*

A figura 108 apresenta o sinal de saída do conversor *flyback* acionado pelo controle analógico em malha aberta.

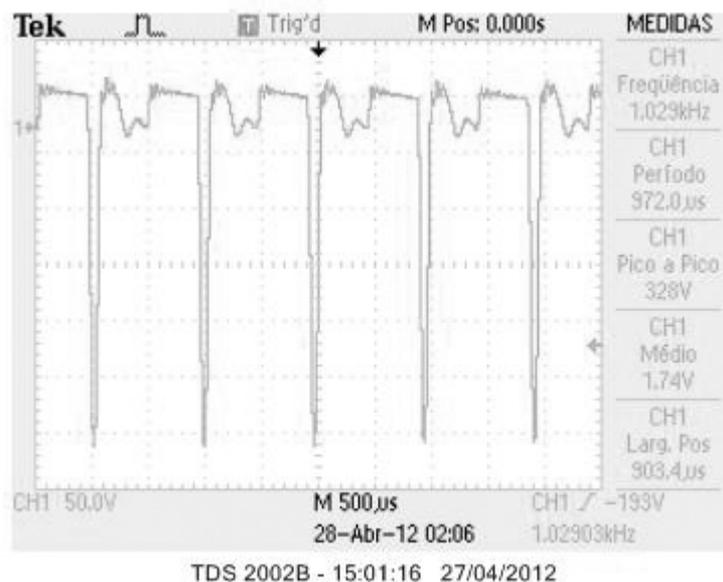


Figura 108. Amostra do sinal de saída do conversor *flyback*, quando alimentado com fonte chaveada e com controle analógico

Uma análise mais completa da qualidade e rendimento do conversor *buck*, é apresentada no capítulo 4.3, juntamente com um circuito de controle digital, proteções e sinalizações por meio de um controlador digital de sinais (DSC).

4.3 Resultados para o Gerador em Alta Frequência com Controle Digital

Optou-se pelo desenvolvimento de estratégias de controle digital, visando redução dos circuitos eletrônicos (substituídos por linhas de programação), desta forma, diminuindo a possibilidade de falhas em componentes, redução de custos, obtenção de processamento em tempo real, controle PWM com ação PI, proteções e sinalizações em um único chip, tais como implementação de *soft-start*, temporização para o relé de limitação de corrente *inrush*, controle de temperatura em 2 níveis, monitoramento do nível de rede elétrica, entre outros.

4.3.1 Conversor *Buck*

O conversor *buck* desenvolvido apresentou rendimento de 89% para as condições apresentadas na tabela 17:

Tabela 17. Rendimento do conversor *buck*

Entrada	Saída
$V_{in} = 175,3 \text{ V}$	$V_{out} = 36,65 \text{ V}$
$I_{in} = 336 \text{ mA}$	$I_{out} = 1,425 \text{ A}$
$P_{in} = 58,90 \text{ W}$	$P_{out} = 52,23 \text{ W}$
$\eta = 0,89$	

O sistema gerador de ozônio operando em alta frequência com controle digital apresentou um fator de potência de 0,45 quando alimentado em 127 Vrms, valor medido por meio de um instrumento Fluke 43B. Este resultado já era esperado, uma vez que o sistema não possui conversor para correção do fator de potência.

As figuras 109 e 110 apresentam o comportamento do sinal PWM para o conversor *buck* sem carga e alimentado em 127 Vrms e 220 Vrms, respectivamente.

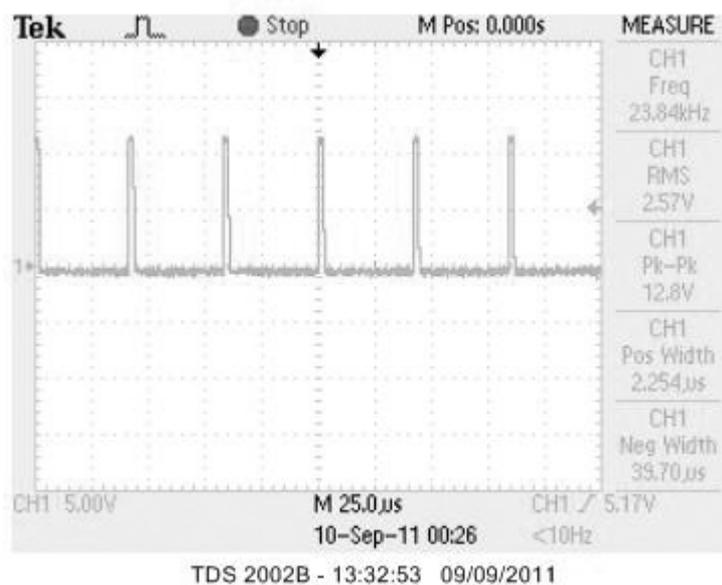


Figura 109. Sinal PWM sem carga, alimentado em 127 Vrms

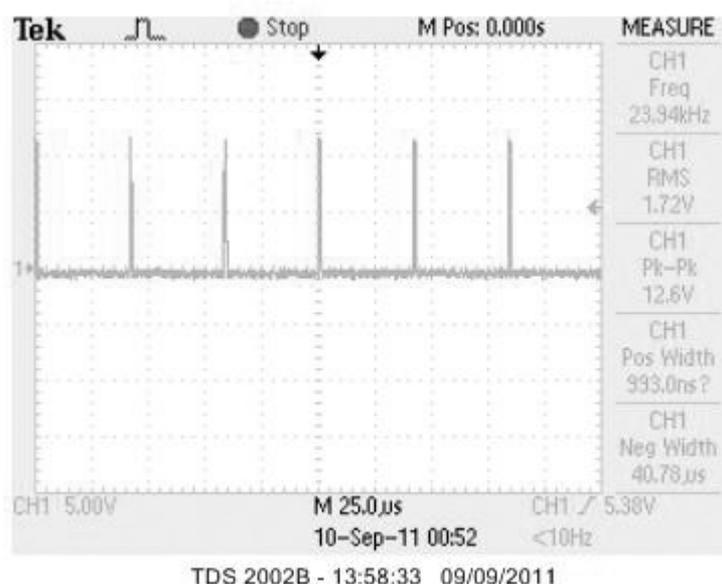


Figura 110. Sinal PWM sem carga, alimentado em 220 Vrms

Quando alimentado em 127 Vrms, o nível DC de entrada do conversor é menor, o que justifica a maior largura de pulso no sinal PWM quando comparado com a alimentação em 220 Vrms.

A figura 111 apresenta o sinal na saída do conversor *buck* quando alimentado em 127 Vrms.

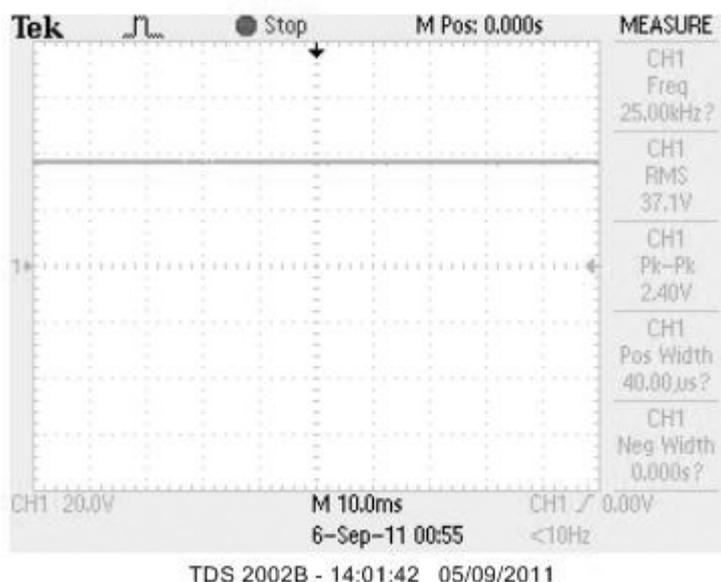


Figura 111. Saída sem carga, alimentado em 127 Vrms

O sinal de saída se manteve constante quando alimentado em 220 Vrms e quando submetido a uma carga de 50% e 100%, o que representa 750 mA e 1,5 A, respectivamente.

As figuras 112 e 113 apresentam o comportamento do sinal PWM para o conversor *buck* com uma carga de 50% quando alimentado em 127 Vrms e 220 Vrms, respectivamente.

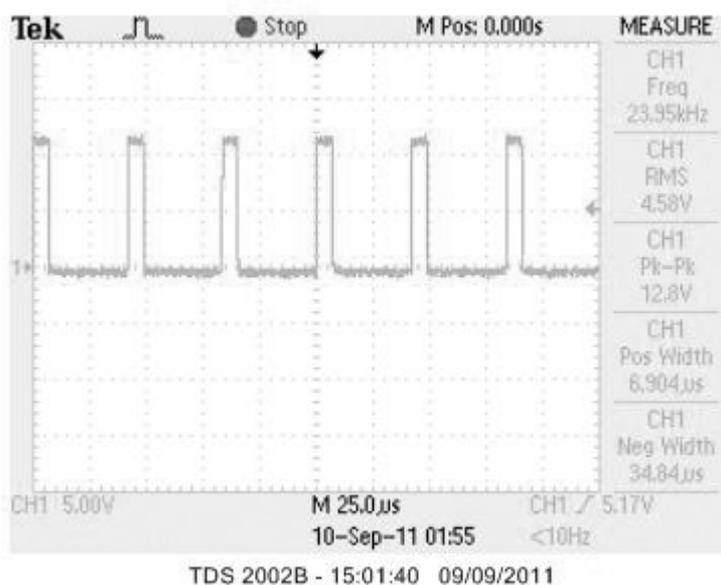


Figura 112. Sinal PWM com 50% de carga, alimentado em 127 Vrms

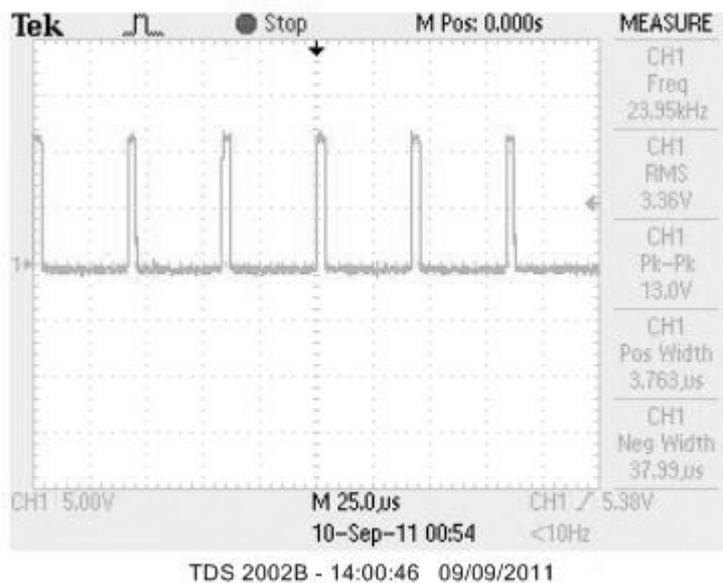


Figura 113. Sinal PWM com 50% de carga, alimentado em 220 Vrms

As figuras 114 e 115 apresentam o comportamento do sinal PWM para o conversor *buck* com uma carga de 100% quando alimentado em 127 Vrms e 220 Vrms, respectivamente.

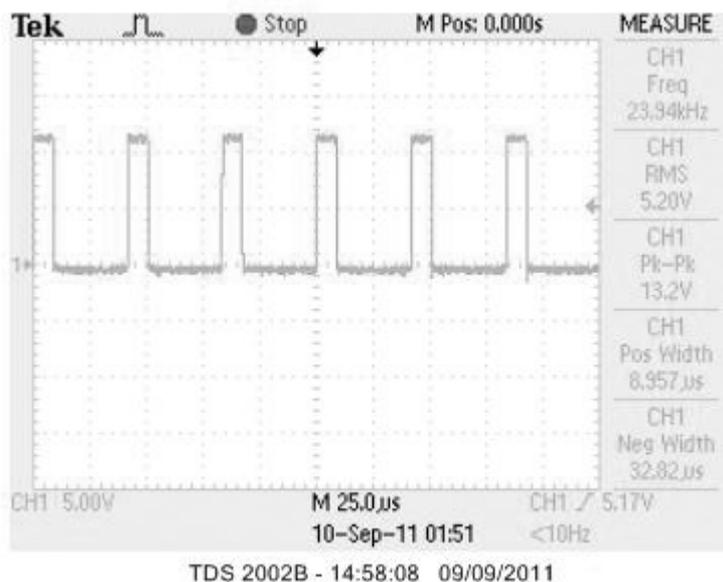


Figura 114. Sinal PWM com 100% de carga, alimentado em 127 Vrms

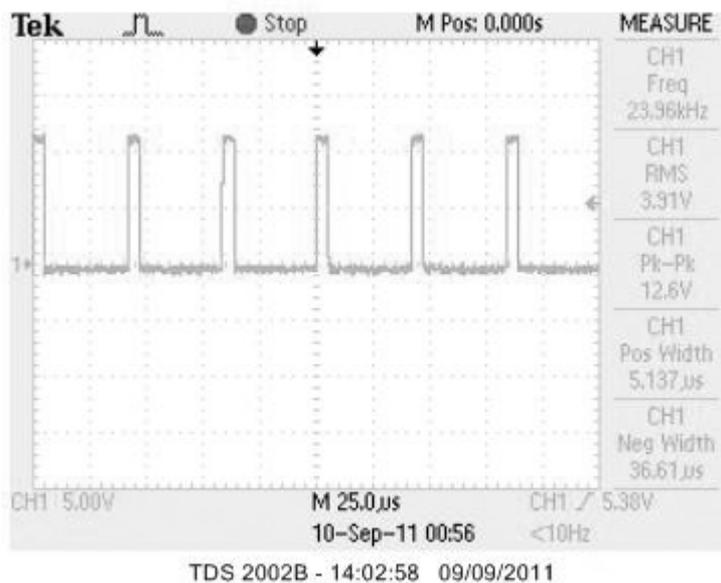


Figura 115. Sinal PWM com 100% de carga, alimentado em 220 Vrms

As figuras 116 e 117 apresentam o comportamento do sinal PWM para o conversor *buck* alimentando o conversor *flyback* em condições nominais, onde a corrente de saída do conversor *buck* foi medida em 864 mA e a tensão em 36,65 V, quando alimentado em 127 Vrms e 220 Vrms, respectivamente.

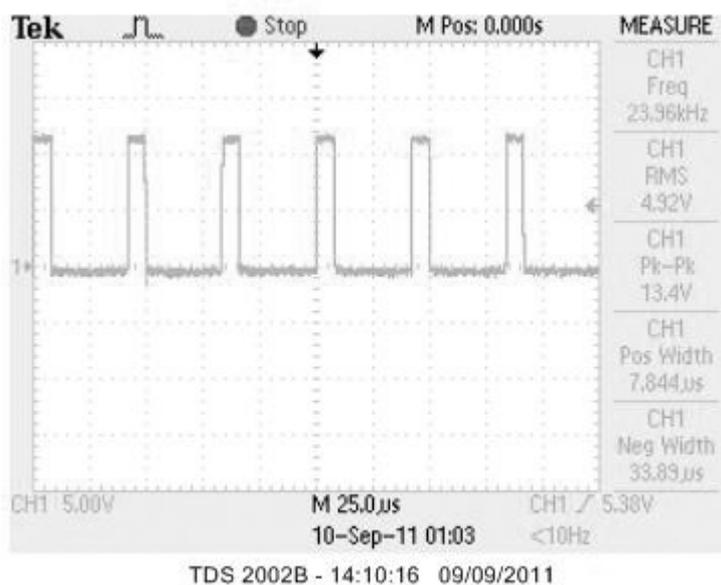


Figura 116. Sinal PWM acionando *flyback*, alimentado em 127 Vrms

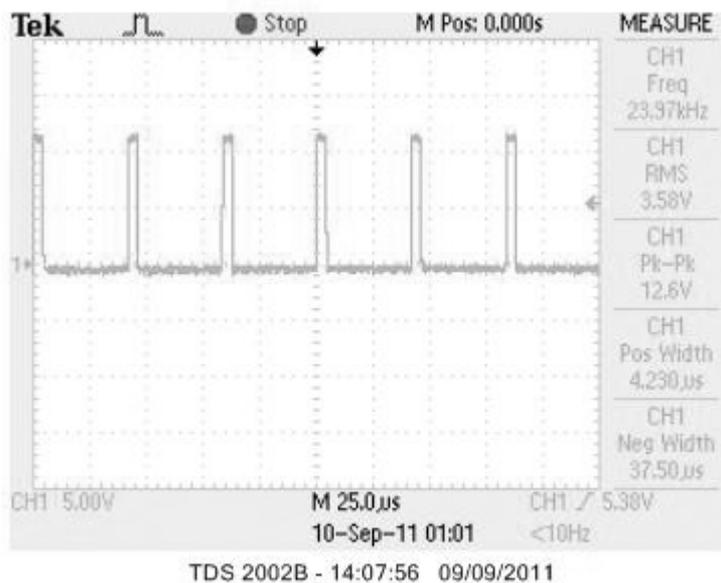


Figura 117. Sinal PWM acionando *flyback*, alimentado em 220 Vrms

Nas figuras de 116 e 117, novamente evidencia-se a diferença na largura dos pulsos PWM devido a diferença do nível DC de entrada do conversor *buck* nestas condições.

As figuras 118 e 119 apresentam a saída do conversor *buck* ao ser ligado em 127 Vrms nas condições, sem ação PI e com ação PI, respectivamente.

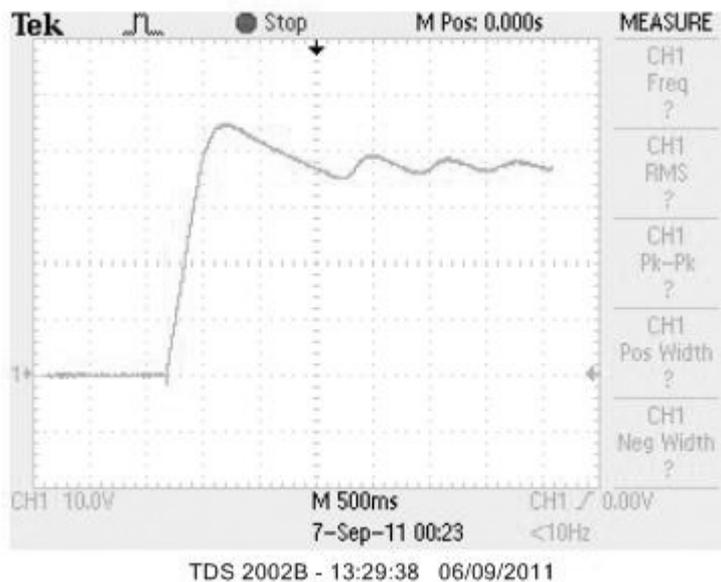


Figura 118. Start sem ação PI, alimentado em 127 Vrms

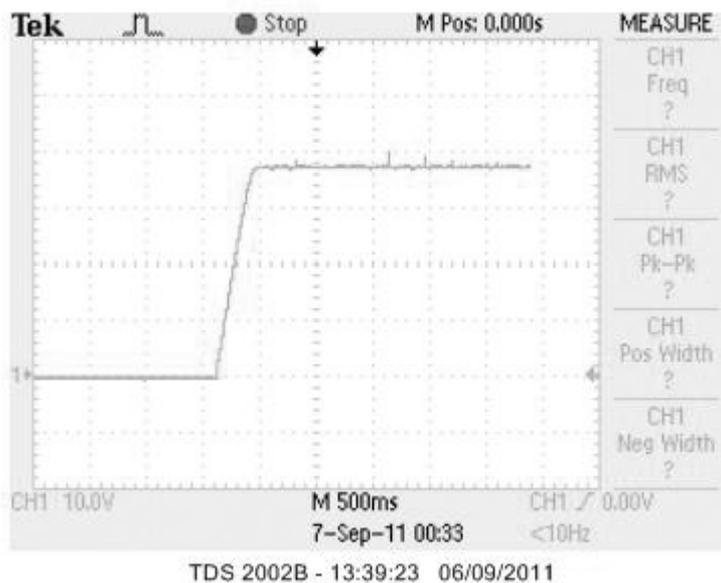


Figura 119. Start com ação PI, alimentado em 127 Vrms

Comparando as figuras 118 e 119 fica evidente a eficiência do controle PI implementado para o conversor *buck*, obtendo uma rápida estabilização no sinal de saída, conforme mostrado na figura 119.

As figuras 120 e 121 apresentam a aplicação de degraus de carga com a aplicação e retirada de uma carga de 0 a 50% (figura 120) e aplicação e retirada de uma carga de 50 a 100% (figura 121).

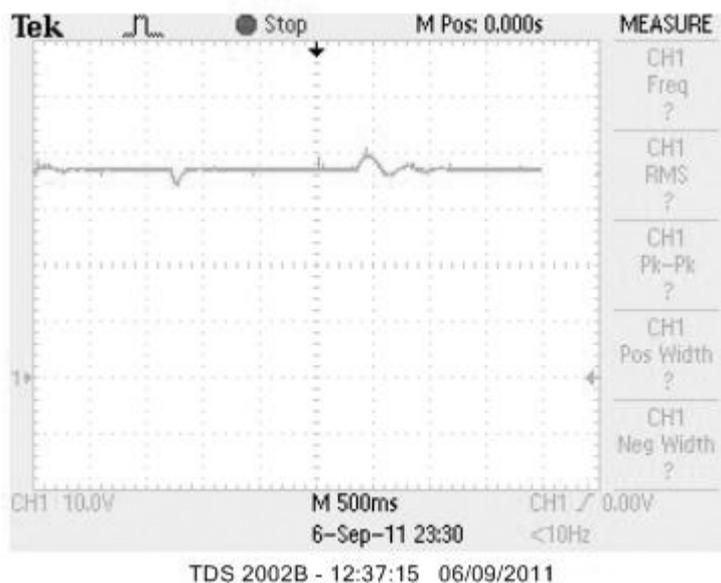


Figura 120. Degrau de carga de 0 a 50%, entrada e saída de carga

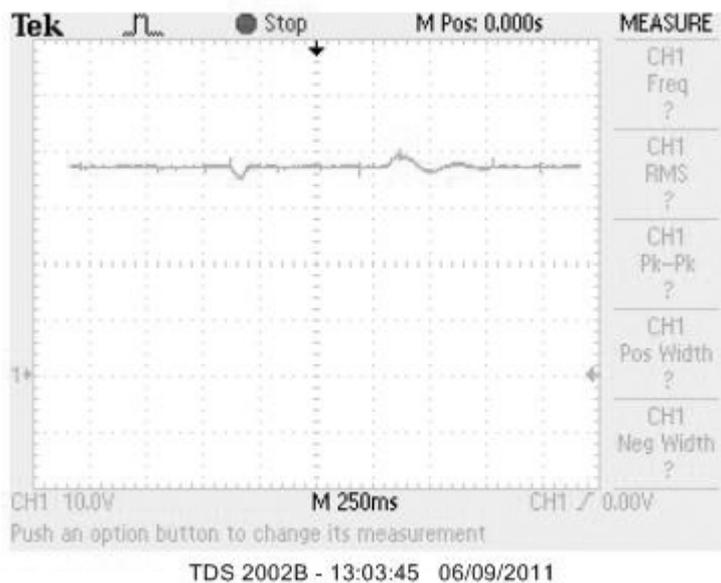


Figura 121. Degrau de carga de 50 a 100%, entrada e saída de carga

A figura 120 mostra que no momento de entrada da carga de 50% houve uma variação de 2,4 V durante um intervalo de 140 ms, enquanto no momento da retirada desta carga houve uma variação de 2,4 V durante um intervalo de 220 ms.

A figura 121 mostra que no momento da variação de carga de 50 para 100% houve uma variação de 1,6 V durante um intervalo de 90 ms, enquanto no momento da variação de carga de 100 para 50% houve uma variação de 2,0 V durante um intervalo de 140 ms.

4.3.2 Conversor *Flyback*

A figura 122 apresenta um gráfico que mostra a relação entre as tensões de entrada e saída para o conversor *flyback*. É possível observar que o crescimento possui um comportamento quase linear, se aproximando muito dos resultados obtidos por Alonso et al (2005).

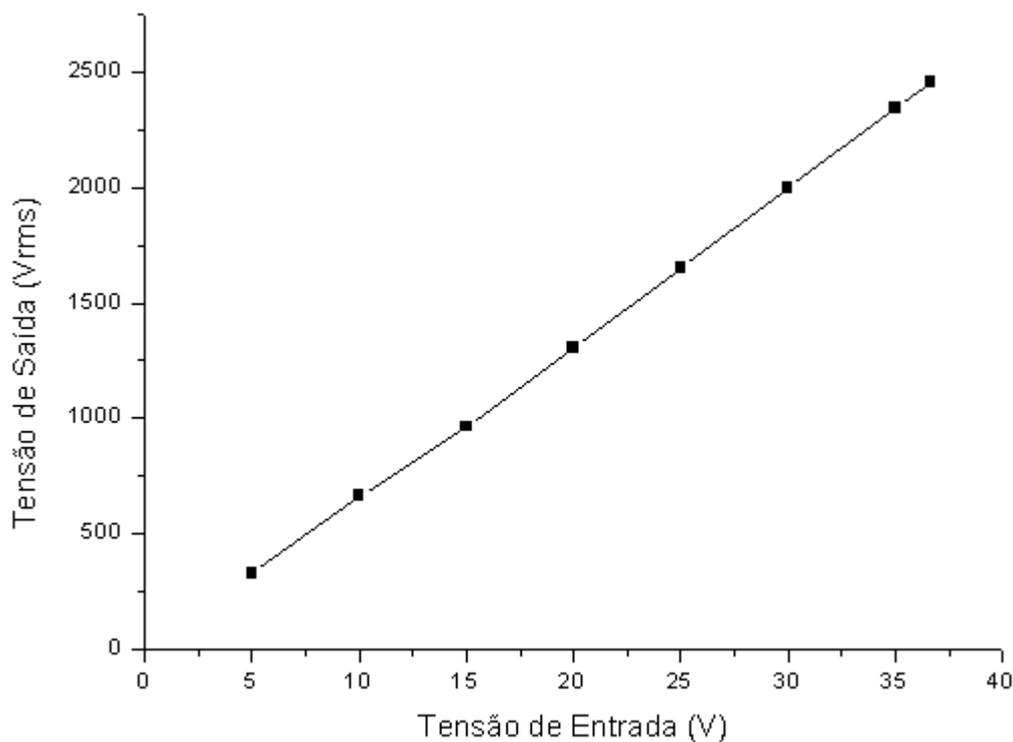


Figura 122. Gráfico V_{out} x V_{in} para o conversor *flyback*

A figura 123 apresenta um gráfico que mostra a relação entre a potência de entrada e o crescimento da tensão de saída para o conversor *flyback*. É possível observar que o crescimento possui um comportamento não linear, sendo mais acentuado no início da curva.

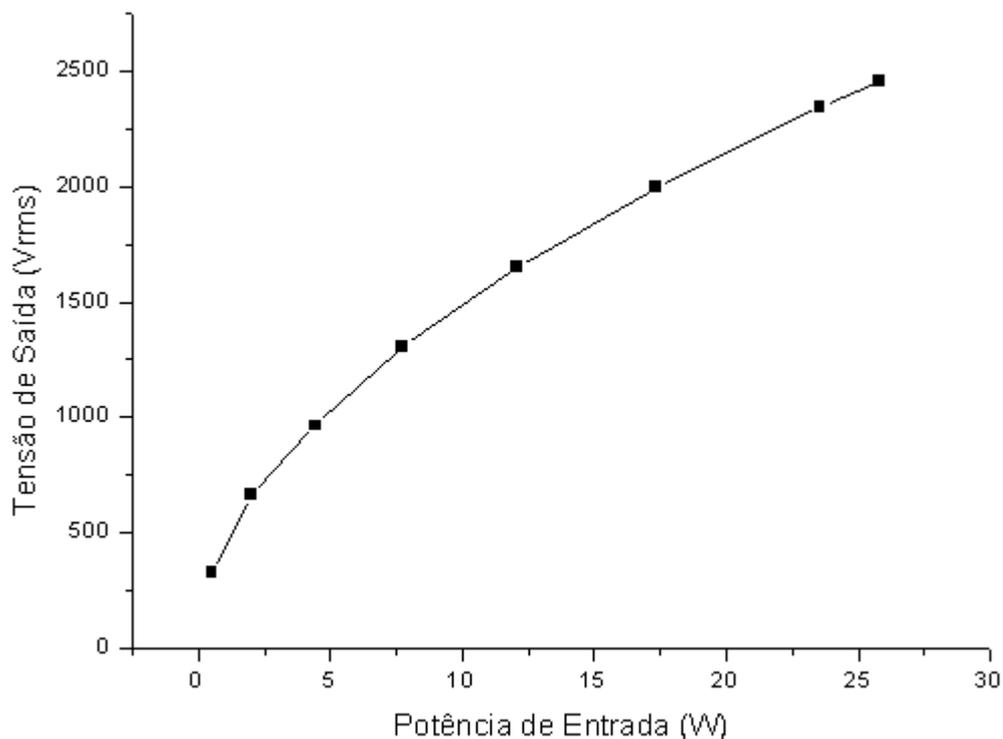


Figura 123. Gráfico V_{out} x P_{in} para o conversor *flyback*

A figura 124 apresenta o sinal PWM do conversor *flyback* em operação normal, ou seja, sendo alimentado com uma tensão de 36,65 V e uma corrente de entrada de 704 mA, o que resulta numa potência de entrada de 25,8 W.

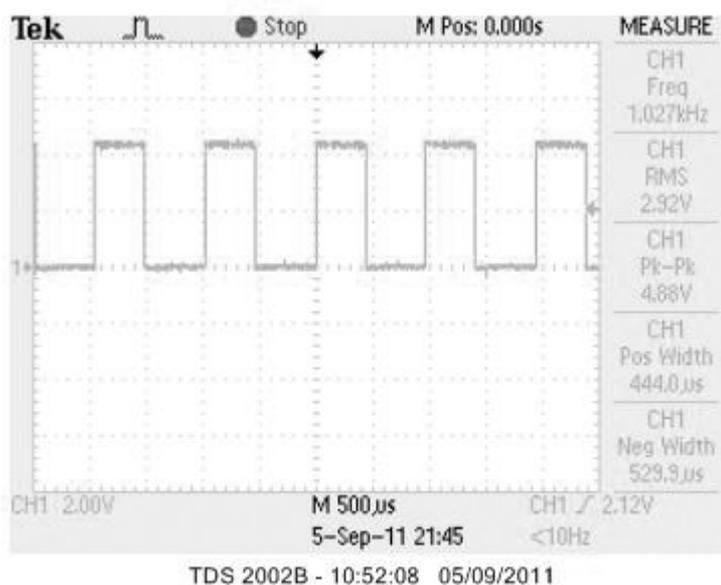


Figura 124. Sinal PWM do conversor *flyback*

A figura 125 apresenta uma amostra do sinal de saída do conversor *flyback* a qual evolui de acordo com o gráfico apresentado na figura 122 e é aplicada ao reator de ozônio. No instante desta medida, o conversor *flyback* apresentava em sua saída uma tensão eficaz de aproximadamente 2,5 kVrms.

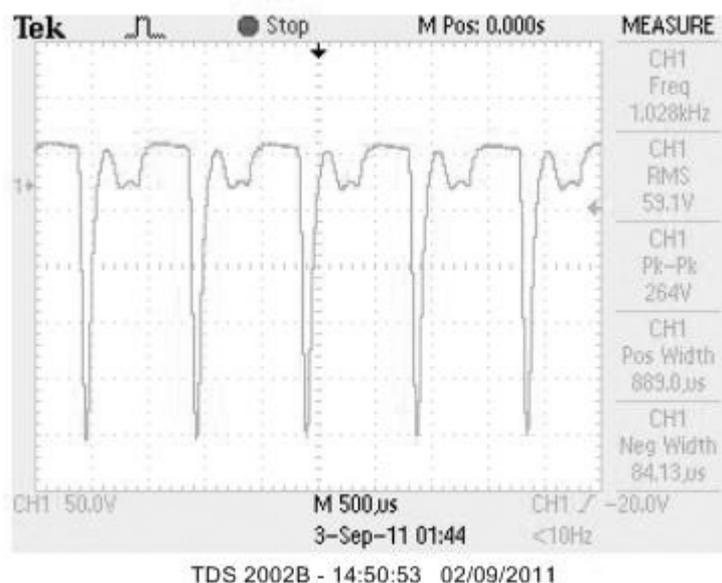


Figura 125. Amostra da tensão de saída do conversor *flyback*

O efeito da descarga corona pode ser visto no sinal de saída, especialmente no semiciclo positivo. Estas micro descargas são a base para a geração de ozônio. Portanto o ozonizador é também um gerador de EMI por natureza. Um estágio de filtro deve ser adicionado na entrada do conversor para evitar a interferência conduzida. Além disso, o reator de ozônio deve ser aterrado, tanto para segurança quanto para evitar a interferência irradiada (Alonso et al, 2005).

A figura 126 apresenta o comportamento do sinal de saída do conversor *flyback* em crescimento a partir do instante em que o equipamento é energizado, sob influência do sistema de partida suave implementado no DSC.

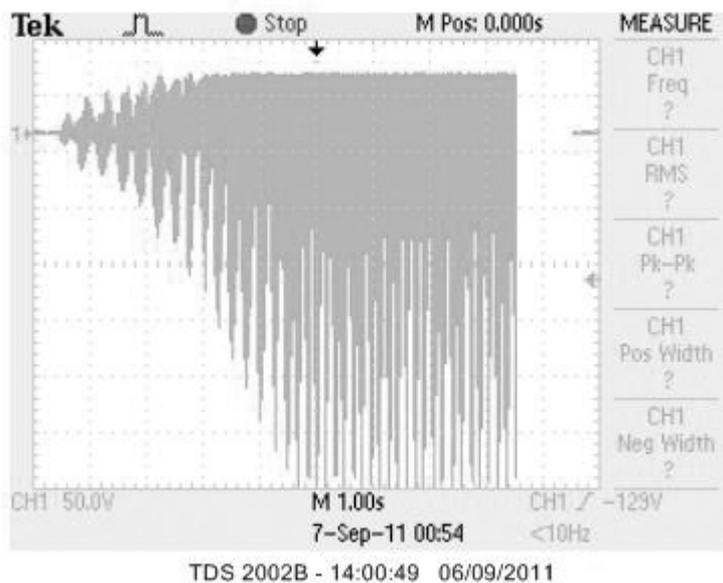


Figura 126. Amostra do crescimento da tensão de saída com ação do soft-start

A figura 127 apresenta uma fotografia do protótipo implementado em testes.

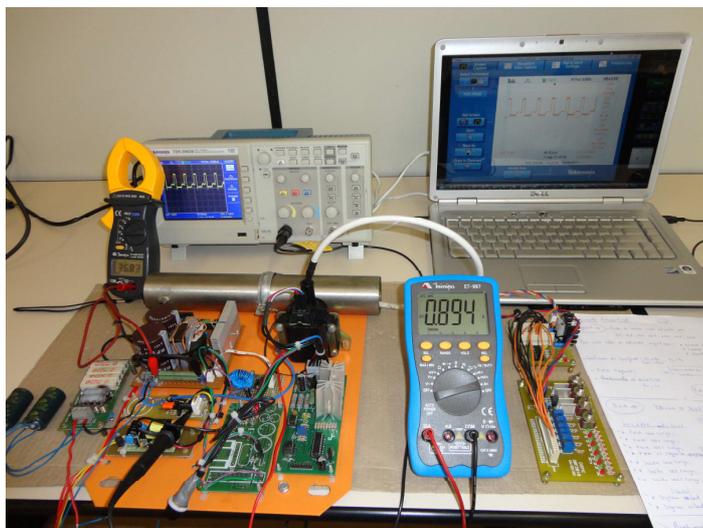


Figura 127. Ensaios de desempenho dos conversores *buck* e *flyback* com controle digital

A figura 128 apresenta uma fotografia da parte interior do reator de ozônio em funcionamento, destacando-se a descarga corona estabelecida em seu interior.



Figura 128. Descarga corona no interior do reator

As figuras 129 e 130 apresentam os protótipos montados com 6 reatores, com e sem concentrador de oxigênio acoplado, respectivamente. Para tanto foram utilizados 6 conversores *flyback* com bobinas automotivas, cada um alimentando um reator. Para realização dos testes, os conversores *flyback* foram alimentados com 36,6 V por meio de fonte convencional de maior potência ao invés do conversor *buck*. Um forte odor de ozônio foi obtido na saída e a produção de ozônio foi em torno de 7,5 gO₃/h com ar ambiente. Estima-se que a produção de ozônio fique acima de 20 gO₃/h para o gerador alimentado com oxigênio puro.

O concentrador de oxigênio (tubos verdes no detalhe da figura 129) foi um projeto a parte, utilizando zeólita e com controle microcontrolado, a concentração de oxigênio medida na saída, foi de 78%.

Para o gerador com concentrador de oxigênio acoplado, a produção de ozônio foi em torno de 15 gO₃/h, uma vez que a concentração de oxigênio era de 78%.



Figura 129. Gerador de ozônio com 6 reatores e concentrador de oxigênio

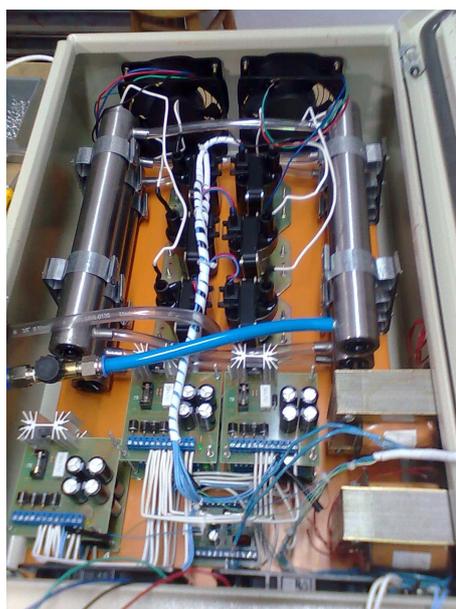


Figura 130. Gerador de ozônio com 6 reatores

4.4 Resultados para os Circuitos Auxiliares, Proteções e Sinalizações

4.4.1 Proteção e Monitoramento da Temperatura

Conforme descrito no capítulo 3, foi utilizado como sensor de temperatura um *thermistor* NTC10K, o qual foi acoplado ao dissipador dos conversores para coletar informações sobre a temperatura de operação do gerador, enviando um sinal de 0 a 5V proporcional a temperatura atual, para uma entrada analógica do DSC.

No DSC foram programados dois níveis de temperatura, sendo o primeiro em 50°C fazendo o acionamento do sistema de ventilação forçada via saída digital do DSC, o segundo nível programado foi em 60°C, fazendo com que o programa bloqueasse as saídas PWM dos conversores e conseqüentemente efetuando o bloqueio total do gerador e sinalizando alarme urgente por meio da luz acoplada na porta do gerador evitando desta forma, a queima de componentes por excesso de temperatura. O circuito foi testado e sua eficácia comprovada na prática.

4.4.2 Monitoramento do Nível da Rede Elétrica

O circuito desenvolvido para o monitoramento do nível da rede elétrica, apresentado no capítulo 4, foi ajustado para fornecer um sinal de 0 a 5 V proporcional a entrada CA de 0 a 300 Vrms, o programa detecta se o equipamento está ligado em 127 Vrms ou 220 Vrms e ajusta os parâmetros de sinalização.

Os níveis ajustados para sinalização de CA baixa e alta foi de +/- 15%, o que representa 108 Vrms e 146 Vrms para rede 127 Vrms e 187 Vrms e 253 Vrms para rede de 220 Vrms.

O circuito foi testado e seu funcionamento comprovado por meio de uma placa de simulação de sinais.

4.4.3 Circuito de Adequação de Nível

O circuito de adequação de nível mostrado no capítulo 4, funcionou corretamente, sendo este, um circuito simples, porém funcional, fornecendo em sua saída uma tensão contínua e constante de 5 V para os circuitos do DSC e auxiliares.

4.4.4 Circuito de Limitação de Corrente *Inrush*

Para a limitação da corrente de *inrush*, foi programada no DSC uma saída digital temporizada ajustada para ficar em nível alto (acionada) por 2 segundos após o início de funcionamento do gerador. Este sinal aciona um transistor bipolar NPN que aciona um relé pelo tempo programado, forçando a passagem da corrente por um resistor de $47\Omega/5W$ fazendo a limitação da alta corrente de partida devido à carga inicial dos capacitores de filtro.

O circuito foi testado e seu funcionamento comprovado por meio de uma placa de simulação de sinais, inicialmente.

4.4.5 Conversor CA/CC

Conforme especificações descritas no item 3.7.2, o conversor CA/CC trata-se de uma fonte chaveada de baixa potência, fornecendo uma tensão de 12 V e uma corrente máxima de 900 mA.

A função deste conversor é fornecer a tensão de alimentação aos circuitos auxiliares e controle PWM digital, para o início do funcionamento dos conversores e manutenção destes. Por se tratar de um circuito apenas de controle, seu consumo de energia é extremamente baixo, fazendo com que o conversor CA/CC opere com uma carga muito abaixo de suas especificações, evitando aquecimento e variações em sua saída, satisfazendo as necessidades do projeto.

4.4.6 Circuito Retificador e Filtro

Na tabela 14 foram apresentadas as especificações técnicas para o circuito retificador de entrada, sendo este, projetado para ser energizado em tensões que variam de 90 a 240 Vrms, conforme figura 84.

Quando alimentado em rede 127 Vrms, apresentou em sua saída uma tensão contínua de 174,7 V e quando alimentado em rede 220 Vrms, apresentou em sua saída uma tensão contínua de 309,3 V, satisfazendo as necessidades do projeto.

Nesta etapa do projeto, existem filtros de entrada e saída, retificador em ponte e proteções tais como, fusível de entrada, varistor, limitador de corrente *inrush* e filtro de linha.

4.5 Resultados: Titulação pelo Método Iodométrico

Após a verificação de todas as conexões elétricas, o compressor foi energizado iniciando a injeção de ar no reator de ozônio, cuja vazão aplicada foi controlada pelo fluxômetro de ar comprimido, variando-se entre 3 e 15 L/min, conforme tabela 18.

Tabela 18. Resultados – ensaios de titulação iodométrica

	Vazão (L/min)	Tempo de borbulhamento de O ₃ no KI (min)	Volume de KI (mL)	Volume de Tiosulfato consumido (mL)	Ozônio Gerado (mg/min)	Ozônio Gerado (mg/h)
1	3	1,5	500	8,3	13,05	783,25
2	3	1,5	500	8,3	13,05	783,25
3	6	1,5	500	10,6	16,67	1000,3
4	6	1,5	500	10,7	16,83	1009,7
5	9	1,5	500	13,5	21,23	1274,0
6	9	1,5	500	13,3	20,91	1255,0
7	12	1,5	500	12,0	18,87	1132,4
8	12	1,5	500	11,6	18,24	1094,7
9	15	1,5	500	11,4	17,93	1075,8
10	15	1,5	500	12,3	19,34	1160,7

Para cada ensaio de produção de ozônio realizado, fixou-se uma vazão de ar. O ozônio gerado no reator em cada ensaio foi continuamente injetado no frasco lavador de gases e borbulhado numa solução de iodeto de potássio por um tempo fixo de 3 min, inicialmente, depois de executar o mesmo teste com tempo de 1,5 min, constatou-se que os resultados foram os mesmos, adotando-se assim este tempo para o restante dos ensaios, conforme tabela 18.

A solução ozonizada no lavador de gases foi coletada e titulada, sendo possível calcular a produção de ozônio do gerador por meio da equação 3.132.

A figura 131 apresenta um gráfico da produção de ozônio do equipamento. Na condição dos ensaios de produção de ozônio o gerador apresentava em sua saída uma tensão eficaz de aproximadamente 2,5 kV enquanto o conversor *flyback* era alimentado por uma tensão de 36,65 V e consumia uma corrente de 704 mA, o que atribui uma potência de entrada de 25,8 W.

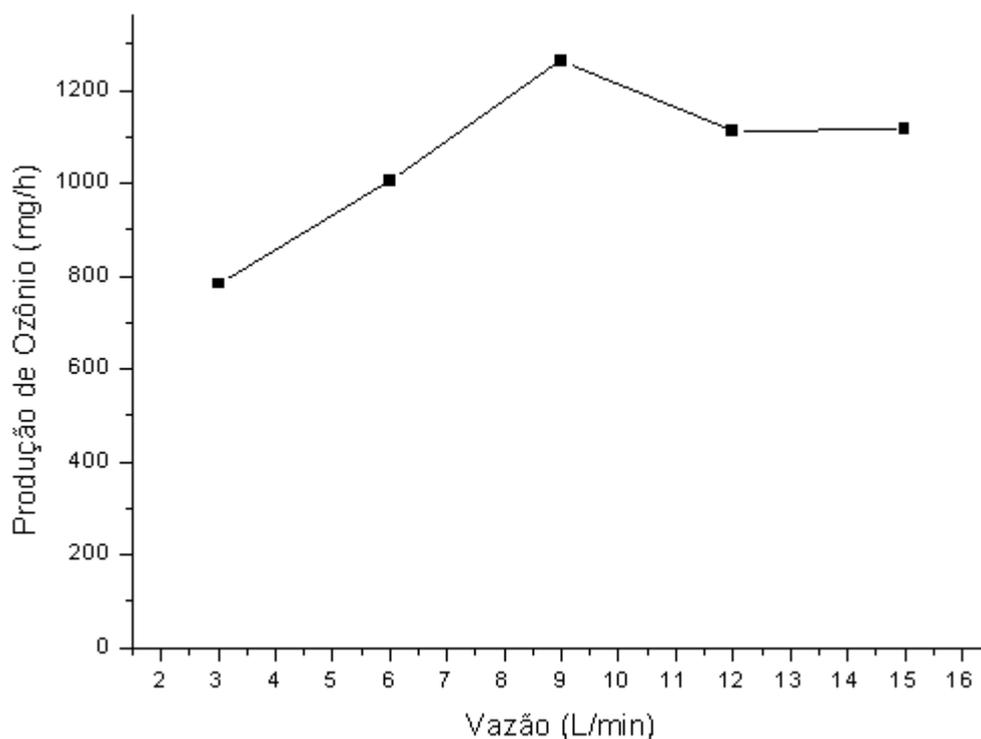


Figura 131. Produção de ozônio na saída do gerador

Ao final dos testes conclui-se que a melhor performance para as condições testadas, foi alcançada com uma vazão de 9 L/min, o que produziu em torno de 21,07 mgO₃/min ou 1,26 gO₃/h, conforme mostrado na tabela 18 e figura 131. Observa-se na figura 131, que há um aumento linear na produção de ozônio entre

3 e 9 L/min, onde é atingida a produção máxima para estas condições. Há uma queda na produção de ozônio de 9 até 12 L/min e a produção permanece praticamente constante até 15 L/min.

Alonso et al (2005) alcançou com sua topologia proposta, uma produção de ozônio máxima de 8 gO₃/h, com um protótipo de 50 W e alimentado com oxigênio puro. De acordo com a literatura (Rice et al, 1986), se o gerador de ozônio for alimentado com oxigênio puro, a produção de ozônio na saída do reator é multiplicada, esperando-se que os novos resultados, com oxigênio puro, se aproximem dos resultados obtidos por Alonso et al (2005).

5 SUGESTÕES PARA PESQUISA - TRATAMENTOS

Algumas aplicações de tratamentos foram testadas com o objetivo maior de observar a redução de cor do composto a ser tratado pelo gerador de ozônio, não levando em consideração outros aspectos químicos e biológicos. Foi testada a redução de cor em um efluente de uma indústria de alimentos, corante têxtil industrial, curtume, caldo de cana para o processo de produção de açúcar cristal, além de um ensaio de conservação de alface crespa. Sugere-se uma investigação completa para cada tratamento citado, caracterizando totalmente as amostras antes e após o tratamento com ozônio. A seguir são apresentados os resultados alcançados com o sistema desenvolvido.

5.1 Tratamento de Efluente de uma Indústria de Alimentos

As figuras 132 e 133 apresentam o procedimento utilizado em um ensaio realizado com efluente industrial, coletado em uma indústria de alimentos. O efluente não foi totalmente caracterizado, porém foi detectada alta concentração de detergente proveniente da sanitização de vasilhames.

Em um teste preliminar, um volume de aproximadamente 30 L deste efluente foi tratado com ozônio por um intervalo de uma hora em regime de recirculação em uma cuba de vidro temperado, com uma bomba e um sistema venturi para injeção do gás. O objetivo foi realizar uma análise visual do resultado obtido. Para isto, amostras foram coletadas, iniciando com uma amostra bruta (sem tratamento) no tempo zero, em seguida em um tempo de 5 min, 15 min, 30 min e 1 h de tratamento. O resultado pode ser visto na figura 134.



Figura 132. Injetando efluente industrial para ensaio de tratamento



Figura 133. Efluente na cuba de tratamento



Figura 134. Resultado ao final do tratamento

Apesar da não caracterização do efluente antes e depois do tratamento, é possível afirmar que alguns parâmetros foram melhorados, como a cor e a turbidez do efluente, mostrando a eficácia do ozônio no tratamento.

5.2 Tratamento de Resíduo a Base de Corante de uma Indústria Têxtil

Com o objetivo de analisar a diminuição de cor e turbidez, foi realizado um ensaio preliminar com corante industrial de indústria têxtil, utilizado para tingimento de roupas, para possíveis aplicações de ozônio no tratamento de efluentes de lavanderias industriais.

O volume testado foi de 50 L, conforme mostrado na figura 135, o tempo total de tratamento foi de 2 h, com amostras coletadas de 10 em 10 minutos. Na figura 136 é apresentado o resultado após 40 min de tratamento, na figura 137 o resultado após 2 h de tratamento e na figura 138 são apresentadas todas as amostras coletadas durante o tratamento em intervalos de 10 min.

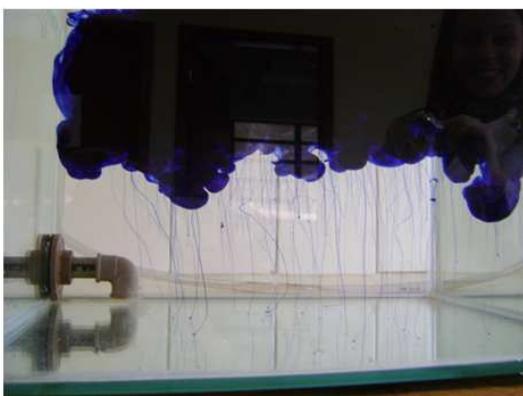


Figura 135. Corante industrial bruto sendo injetado na cuba (50L)



Figura 136. Corante industrial após 40 min de tratamento



Figura 137. Corante industrial após 2 horas de tratamento



Figura 138. Resultado final coletado de 10 em 10 min em 2h

Apesar da não caracterização do efluente depois do tratamento, é possível afirmar que a cor e a turbidez do efluente foram totalmente removidas, mostrando a eficácia do ozônio no tratamento para remoção de cor e turbidez de efluentes têxteis.

5.3 Tratamento de Curtume

O último ensaio preliminar foi realizado com efluente de curtume com um volume de aproximadamente 20 L, ressaltando que o ensaio também foi realizado para avaliação visual, ou seja, não foi caracterizado antes e nem após o tratamento.

A figura 139 apresenta o efluente bruto, coletado direto da fábrica, este foi submetido a um tratamento de 4 h, até atingir os níveis de cor e turbidez mostrados na figura 140.



Figura 139. Curtume bruto

Conforme mostrado na figura 140, a cor e turbidez reduziram de maneira considerável, é possível observar também a formação de uma fina camada de sólidos nas bordas e fundo do reservatório.



Figura 140. Curtume após 4 horas de tratamento

5.4 Clareamento de Caldo de Cana de Açúcar

O caldo de cana foi coletado diretamente de uma usina de açúcar e álcool na região de Maringá-PR. O caldo foi coletado na etapa que antecede o processo de redução de cor e decantação.

O ensaio foi realizado com um volume de 5 L que foi tratado em um tubo de PVC de 100 mm com a extremidade inferior totalmente vedada e a superior com dois furos, um para entrada da mangueira de gás ozônio e outro para saída do gás residual. Foi utilizado um compressor de ar ambiente com a vazão ajustada em 9 L/min, o qual era injetado no caldo por uma mangueira que se

aproximava do fundo do recipiente, o tratamento foi acompanhado por 4 horas ininterruptas.

Houve uma redução de cor considerável, a figura 141 apresenta uma fotografia do caldo antes e após o tratamento com ozônio.

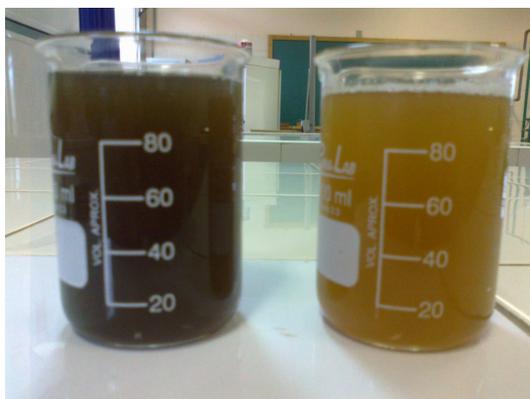


Figura 141. Caldo de cana após 4 horas de tratamento

5.5 Conservação de Alimentos

Investigou-se a aplicação de uma solução de ozônio, como germicida, proveniente do gerador de ozônio desenvolvido em verduras sob condições ambientais não controladas. As amostras foram submetidas a um prévio tratamento e, em seguida, divididas em dois grupos no qual um deles foi submetido à imersão em solução de ozônio e água. Após a estocagem em sacos de polietileno de baixa densidade as amostras foram submetidas a uma análise sensorial. O método sensorial consistiu em análise das amostras em um período de zero a sete dias, no qual foi analisado aroma, cor, textura (não oral). Os dados para a vazão de 6 L/min de ar do gerador com um tempo de solubilização do ozônio de 1,5 min e tempo de imersão da amostra na solução de 1,5 min foram os que apresentaram melhores resultados, superando outras condições propostas além da amostragem padrão que não sofreu nenhum tratamento com ozônio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O uso de alimentação em alta frequência permitiu um aumento na densidade de potência aplicada ao reator e um aumento na produção de ozônio, enquanto diminuiu o nível de tensão para descarga corona e compactou o equipamento. Como o conversor possui apenas circuito retificador de entrada, o fator de potência medido foi muito baixo, para melhorar este parâmetro, pode ser implementado um conversor *boost* na entrada, o que elevaria o fator de potência do sistema, ou simplesmente fazer a correção por outros métodos.

A fonte convencional desenvolvida foi eficaz para validação do reator, no entanto, é uma fonte totalmente sem controle, em baixa frequência, volumosa e pesada devido transformador de baixa frequência, todas as variações de entrada são refletidas na saída, a variação de temperatura influencia na tensão e corrente de saída, tudo isso contribuindo para uma instabilidade na produção de ozônio na saída. O controle adotado para o conversor *flyback* alimentado com esta fonte, foi o mais simples possível, um oscilador com CI 555 operando no modo astável, totalmente em malha aberta.

Conforme resultados apresentados, os controles analógico e digital aplicados aos conversores apresentaram bom desempenho, tanto nas etapas de controle quanto nas etapas de proteções e sinalizações. As principais vantagens do controle digital em relação ao analógico são a flexibilidade de alterações via programação sem a necessidade de refazer circuitos, redução de componentes e circuitos analógicos substituídos por linhas de programação oferecendo compactação ao equipamento, processamento em tempo real, baixo custo, possibilidade de controlar um número maior de conversores por meio das várias saídas PWM do DSC, podendo-se escolher ainda um chip com maior número de saídas, maior confiabilidade no uso do equipamento devido a redução de componentes susceptíveis a falhas, possibilidade de comunicação com um computador, desenvolvimento de um *software* supervisor para monitoramento remoto, inclusão de um display de cristal líquido para medida da concentração de ozônio na saída do gerador, entre outras.

O consumo nominal do conversor *flyback* acionando o reator com 2,5 kVrms foi de 25,8 W, gerando uma produção de ozônio de 1,25 gO₃/h com ar ambiente, conforme apresentado nos resultados. O conversor *buck* foi projetado para fornecer uma potência de saída de no máximo 183 W, o que daria para alimentar um sistema modular de 6 conversores *flyback* e conseqüentemente 6 reatores com folga, o consumo ficaria em torno de 155 W. Para inclusão de mais reatores, pode-se associar as saídas de vários conversores *buck* em paralelo, multiplicando a potência de saída conforme necessidade.

A estratégia de controle digital adotada satisfaz as necessidades de potência dos conversores projetados, além de fornecer um tempo de resposta muito pequeno na correção do sinal PWM, devido processamento em tempo real realizado pelo DSC.

O projeto foi desenvolvido também pensando na utilização de energias renováveis, uma vez que há uma previsão de escassez de energia mundial em um futuro não muito distante. Com a possibilidade do uso de um sistema fotovoltaico, o equipamento desenvolvido pode ser instalado em regiões remotas ou nas margens de rios, lagoas, no meio de plantações, facilitando assim o pré tratamento da água, conservação de alimentos entre outros. A utilização de um *timer* proporcionou a operação automática de forma programada.

Ao final dos ensaios de concentração de ozônio, constatou-se que a melhor performance alcançada para um reator, foi a uma vazão de alimentação de ar ambiente de 9 L/min, o que produziu em torno de 20,8 mgO₃/min ou 1,25 gO₃/h, conforme mostrado na figura 131, para tanto, o gerador de ozônio consumiu uma potência de 25,8 W. Alonso et al (2005) alcançou com sua topologia proposta, uma produção de ozônio máxima de 8 gO₃/h, com um protótipo de 50 W e alimentado com oxigênio puro. De acordo com a literatura (Rice et al, 1986), se o gerador de ozônio for alimentado com oxigênio puro, a produção de ozônio na saída do reator aumenta consideravelmente, esperando-se que os novos resultados se aproximem dos resultados obtidos por Alonso et al (2005). A diferença de potencial gerada pelo conversor *flyback* nos reatores foi de aproximadamente 2,5 kV eficaz.

O sistema de forma modular possibilitou uma maior produção de ozônio, um sistema com 6 reatores foi montado em nível de protótipo (figura 129), para tanto foram utilizados 6 conversores *flyback* com bobinas automotivas, cada um

alimentando um reator. Para realização destes ensaios, os conversores *flyback* foram alimentados com 36,6 V por meio de uma fonte convencional de maior potência ao invés do conversor *buck*, um forte odor de ozônio foi obtido na saída, produzindo aproximadamente 7,5 gO₃/h, alimentados com ar ambiente. A topologia proposta é uma opção excelente para fornecimento de descarga corona.

6.2 Sugestões Para Futuros Trabalhos

Segue sugestões para futuros trabalhos na linha de desenvolvimento de geradores de ozônio operando com chaveamento em alta frequência.

- Sugere-se a substituição do conversor *buck* por um conversor *boost* (elevador de tensão), o que elevaria o fator de potência do sistema. Para isto, deve-se projetar o conversor *boost* de acordo com as necessidades de potência do sistema. Como o barramento de tensão CC seria da ordem de 300 V, impossibilitaria a utilização de uma bobina automotiva para o conversor *flyback*, sendo necessário o projeto e desenvolvimento de um novo conversor *flyback* com transformador, impossibilitando ainda, a inclusão de um sistema fotovoltaico, a menos que se projetasse mais um conversor elevador de tensão para as baterias.

- A adição de uma interface homem máquina (IHM) com *display* de cristal líquido (LCD) para leitura instantânea da produção de ozônio, facilitaria sua utilização, dispensando o uso de tabelas de produção de ozônio em função da vazão e tensão de saída, para o caso de controle PWM variável.

- Adição de um potenciômetro digital na IHM para variação da produção de ozônio por meio do controle PWM.

- Implementação de um *software* supervisor para monitoramento remoto das condições do sistema.

- Ensaios completos de aplicações em tratamentos de águas, efluentes, conservação de alimentos, clareamento de caldo de cana entre outros, além de aplicações em regiões remotas.

6.3 Publicações

A seguir apresenta-se as publicações e submissões geradas por meio do desenvolvimento deste trabalho.

- Patente: O pedido de patente foi protocolado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) em 09.03.2012, sob protocolo número 015120000492. No âmbito da UEM o pedido está registrado sob processo número 2404/2012, conforme anexo 8.

- Artigo Publicado no Congresso Brasileiro de Engenharia Química (XI COBEQIC – UEM/2011) - Título do trabalho: Determinação da vazão de ozônio produzida por um gerador de ozônio automatizado.

- Artigo Publicado no Encontro Anual de Iniciação Científica (XX EAIC – UEPG/2011) - Título do trabalho: Investigação do uso de um sistema gerador de ozônio automatizado na conservação de verduras.

- Artigo Aceito para Publicação no Congresso Brasileiro de Automática (XIX CBA – UFCG/2012) - Título do trabalho: Projeto e análise de um sistema gerador de ozônio operando em alta frequência com controlador digital de sinais.

- Submissão, Revista “Ozone: Science & Engineering” – Qualis A1 (Eng. II) Título do trabalho: Design and analysis of an ozone generator system operating at high frequency with digital signal controller.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SALAM M. et al.; *High-voltage engineering: theory and practice*. 2. ed. New York, Mareei Dekker. 2000.

ALONSO, J. M. et al.; *Low-power high-voltage high-frequency power supply for ozone generation*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v40, n.2, p414-421, 2004.

ALONSO, J.M. et al.; *Low-power high-voltage universal-input inverter for ozone generation*. CI EP. Guadalajara, October 20-24, México, p.153-159, 2002. Artigo com informações de ozônio e ozonizadores.

Aneros *Advanced Oxidation Techonologies*. Disponível em <http://www.aneros.de/9-ozoneanalyzer_e.htm#Ozone_sensor> Acesso em: 06/06/2012

APHA; A WWA; WEF. *Standard methods for examination of water and wastewater 19^a ed*. Washington D.C., American Publications Health Association. 1995.

ARMAROLI, J. G.; Nova abordagem de ozonizadores para tratamento de água e esgoto por descarga corona. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

ASSIRATI, D. M.; Desinfecção de efluentes de ETE com ozônio para uso agrícola. Campinas, 2005, Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5456: Eletricidade geral: terminologia. Rio de Janeiro, 1987.

BALAKRISHNAN, P. A.; ARUNAGIRI, A.; RAO, P.G.; *Ozone generation by silent electric discharge and its application in tertiary treatment of tannery effluent*. *Journal of Electrostatics* 56 p. 77-86, 2002.

BASSANI, L.; Desinfecção de efluente sanitário por ozônio: parâmetros operacionais e avaliação econômica. Florianópolis, 2003, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BELEVTSSEV, A. A.; *Modem theory of corona discharge*. In: *3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Tokyo, July 8-12, Japan, 1991.

BRAGA, Benedito et al.; *Introdução à Engenharia Ambiental*. São Paulo: Prentice Hall 2002.

Brasil Ozônio Soluções Tecnoecológicas com Ozônio. Disponível em <http://www.brasilozonio.com.br/pag_aplic_01.html> Acesso em: 06/06/2012.

CAMEL, V. & BERMOND, A.; *The Use Of Ozone And Associated Oxidation Processes In Drinking Water Treatment. Laboratoire de Chimie Analytique. Institut National Agronomique Paris-Grignon. Paris, France, 1998.*

CERVA, L. L.; Estudo e Implementação de um Gerador de Ozônio de Pequeno Porte e Baixo Custo Aplicado a uma Estação de Tratamento de Água Didática. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

CHALMERS, L. D. et al.; *Ozone generation by pulsed corona discharge in a wire cylinder arrangement. IEEE, London, 1994.*

CHANG J. S., LAWLESS, A; YAMAMOTO T.; *Corona discharge processes. IEEE Transactions on Plasma Science*, v.19, n.6, p.1152-1166, 1991.

CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.); Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por sistemas de desinfecção. Projeto PROSAB; FINEP, 2001.

CHEN, J.; *Direct current corona-enhanced chemical reactions. Minnesota, 2002. 242 p. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy - University of Minnesota, Minnesota.*

COSTANZI, R. N.; Estudo de tratamentos físico-químicos: flotação por ar dissolvido, sedimentação, micro filtração e ozonização do efluente de uma fábrica de papel para imprimir visando o reuso de água. São Carlos, 2000, Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DANIEL, L. A. (Coord.); Processos de Desinfecção e Desinfetantes alternativos na produção de água potável, São Paulo: Projeto PROSAB; FINEP, 2001.

DI BERNARDO, L., Di Bernardo, A., Centurione Filho, P. L.; Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água. São Carlos: RiMa, 2002.

DI BERNARDO, L. DANTAS, A. D. S.; Métodos e técnicas de tratamento de água. Volumes 1 e 2. 2. ed. São Carlos, SP. Rima Editora. 2005.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P.; Seleção de tecnologias de tratamento de água. Volumes 1 e 2. São Carlos, SP. Editora LDiBe. 2008.

ELETROBRÁS. Conservação de energia: Eficiência energética de instalações e equipamentos. Procel. Itajubá, MG, Editora da EFEI, 2001.

ELIASSON, B.; KOGELSCHATZ, U.; *Modeling and applications of silent discharge plasmas. IEEE Transactions on Plasma Science*, v.19, n.2, p.309-323, 1991.

EL-MOHANDES, M. T. et al.; *Ozone production in corona discharges in air in a multi-needle to plane configuration. IEEE* p.1567-1569, 1985.

Emerson Process Management. Disponível em <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq_Manual_51-5081C.pdf> Acesso em: 06/06/2012.

GALLO, C. F.; *Corona - a brief status report. IEEE Transactions on Industry Applications*, v.1A-13, n.6, p.550-556, 1977.

GODATE, P. R.; PANDIT, A. B.; *A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. Advances in Environmental Research* 8 - Elsevier. p.501-551, 2004.

GONÇALVES, R. F. (coord.). *Desinfecção de efluentes sanitários*. Rio de Janeiro: Projeto PROSAS; F1NEP, 2003.

GRABOWSKI, L. R.; *Pulsed corona in air for water, Doctor thesis, Eindhoven, 2006. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006.*

HASSEMER, M. E. N.; *Tratamento de efluente têxtil: processo físico-químico com ozônio e floculação em meio granular*. Florianópolis, 2000. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

JENEI, I.; KISS, E.; *Development of the ozone generation by the variation of auxiliary electrodes. Journal of Electrostatics* 63 - Elsevier p.985-991, 2005.

Jornal da Cana. Disponível em: <<http://www.canaweb.com.br/pdf/198/%5Ctecindla.pdf>> e <<http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/32854+Acucar-branco-mas-sem-enxofre>> Acesso em: 10/03/2011.

KIM, J. G.; YOUSEF, A. E.; CHISM, G. W.; *Use of ozone to inactivate microorganisms on lettuce. Journal of Food Safety, New Brunswick*, v. 19, p. 17-34, 1999.

KNIJNIK, R.; *Energia e meio ambiente em Porto Alegre: bases para o desenvolvimento*. Porto Alegre, CPEA, 1994.

KOGELSCHATZ, U.; ELIASSON, B.; HIRTH, M.; *Ozone generation from oxygen and air: discharge physics and reaction mechanisms. Ozone Science & Engineering*, v.10, p.367-378, 1988.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; *High-voltage engineering: fundamentals. 1. ed. Pergamon Press*. 1984.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J.; *High Voltage Engineering: Fundamentals. 2nd ed. Newnes* 2000.

LANGLAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BINK, D. R.; *Ozone in water treatment: application and engineering*. Lewis Publishers, 1991. 569 p.

LUKES, P.; *Water treatment by pulsed streamer corona discharge, Ph.D. thesis, Prague, 2001. Institute of Chemical Technology, Prague, 2001.*

MALIK, M. A; GHAFAR, A; MALIK, S.; *A Water purification by electrical discharges. Plasma Sources Sei. Technol. P.82-91, 2001.*

MELLO, L. F. P.; *Projeto de Fontes Chaveadas. 2ª edição. São Paulo: Editora Érica, 1988.*

MENDES, R. L.; *Controle de compostos orgânicos precursores e subprodutos da desinfecção em mananciais eutrofizados mediante combinação de interozonização e sistemas pós-filtros adsorvedores. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.*

Mettler Toledo International Inc.; *Sensor de Ozônio Dissolvido, disponível em: <http://br.mt.com/br/pt/home/products/ProcessAnalytics/DO_Flow_Sensor/Thornton_Ozone_Family.html> Acesso em: 20/03/2011.*

Microchip Technology Inc.; *Datasheet/documentação dsPIC30F2010 Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70118e.pdf>>. Acesso em: 10/09/2010.*

MUKKAVILLI, S. et al.; *Modeling of the electrostatic corona discharge reactor. IEEE Transactions on Plasma Science, v.16, n.6, p.652-660, 1988.*

MURAICA, M.M. et al.; *Ozonized water generator based on coaxial dielectric-barrier-discharge in air. Vacuum 73 - Elsevier, p.705-708, 2004.*

NASCIMENTO, L. C.; LIMA, L. C. O.; VALLE, R. H. P.; *Uso de derivados clorados, ozônio e ultra-som na sanificação de água e alimentos. Higiene Alimentar. São Paulo, v. 19, n. 136 p. 48-57, 2005.*

O3 Technologies Co. Disponível em: <http://www.o3-technologies.com/ozone_library.asp> Acesso em: 19/03/2011.

O3R The Ozone Way. Disponível em: <<http://www.o3r.com.br>> Acesso em: 15/03/2011.

OKTE Engenharia e Consultoria Ltda. Disponível em: <<http://www.okte.com.br>> Acesso em: 15/03/2011.

OGATA, K.; *Engenharia de Controle Moderno. 4ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, Inc., 2003.*

OLIVEIRA, A. S.; ANDRADE, F. S.; *Sistemas Embarcados: Hardware e Firmware na Prática. 1ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2006.*

Ozonium Systems Ltda, *Engenharia do Ozônio. Disponível em: <<http://www.ozonium.com.br/ozonio.php>>. Acesso em: 19/03/2011.*

Ozonizando. Notícias atualizadas sobre ozônio e suas aplicações. Disponível em: <<http://www.ozonizando.com.br/>>. Acesso em: 19/03/2011.

PANAGET, M. P.; GOLDMAN A; GOLDMAN M.; *Ozone in wire-to-plane electrode systems. In: International Symposium on Electrical Insulation (ISEI). Montreal, Quebec, June 16-19, Canada: 1996.*

PARK, J. S. et al.; *Development of small and efficient ozone generation using corona discharge. Korus - physics, IEEE, p.282-284, 2001.*

Patentes Online. Disponível em: < <http://www.patentesonline.com.br/processo-de-clarificacao-do-caldo-de-cana-de-acucar-por-ozonizacao-3319.html>> Acesso em: 06/06/2012.

PONTIGA, F.; SORIA, C.; CASTELLANOS A.; *Ozone generation in coaxial corona discharge using different material electrodes. In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). IEEE. 2004.*

PRESTES, E. B., Avaliação da eficiência do ozônio como sanitizante em hortaliças folhosas minimamente processadas. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2007. Tese de doutorado.

RICE, R. G.; BOLLYKY, L. J.; LACY, W. J.; *Analytical aspects of ozone treatment of water and wastewater. Chelsea: Lewis, 1986.*

RICE, R. G.; BOLLYKY, L. J.; LACY, W. J.; *Applications of ozone for industrial wastewater treatment - a review. Ozone: Science & Engineering, v.18, p.477-515, 1996.*

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A.; Tratamento de Água. Tecnologia Atualizada. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

ROSSETTI, A. R.; Dicionário iterativo de química, 2007.

RUTHER, R.; Instalações solares fotovoltaicas integradas a edificações urbanas e interligadas à rede elétrica pública. Florianópolis, 2000.

SAIA, F. T.; Remoção de cor de efluente de indústria têxtil por processo avançado de oxidação. São Carlos, 1999. 319 p. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SCHIAVON, G. J.; No-Break 1,2kVA, Senoidal, Operando em Malha Fechada: Circuito de Potência, Circuito de Controle Analógico e Circuito de Controle Digital com DSC. Londrina, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina.

SHIMOSAKI, M. et al.; *Effect of trigger electrodes configuration of a double discharge ozonizer on ozone generation characteristics*. *Vacuum* 73 - Elsevier p.573-577, 2004.

SILVA, R. L. G. N. P.; *Introdução a Química analítica quantitativa experimental I*, 2007.

SNATURAL LTDA. *Simulação computacional da degradação de membrana bacteriana*. Disponível em: <<http://www.snatural.com.br/Tratamento-Agua-Ozonio.html>>. Acesso em: 19/03/2011.

Spartan Environmental Technologies Air and Water Treatment. Disponível em: <<http://www.spartanwatertreatment.com/venturi.html>> Acesso em janeiro/2011.

STANLEY, B.; *Electrolytic ozone generation and its application in pure water systems*. *Water Conditioning & Purification Magazine*, v.46, n.8, p.26-30, 2004.

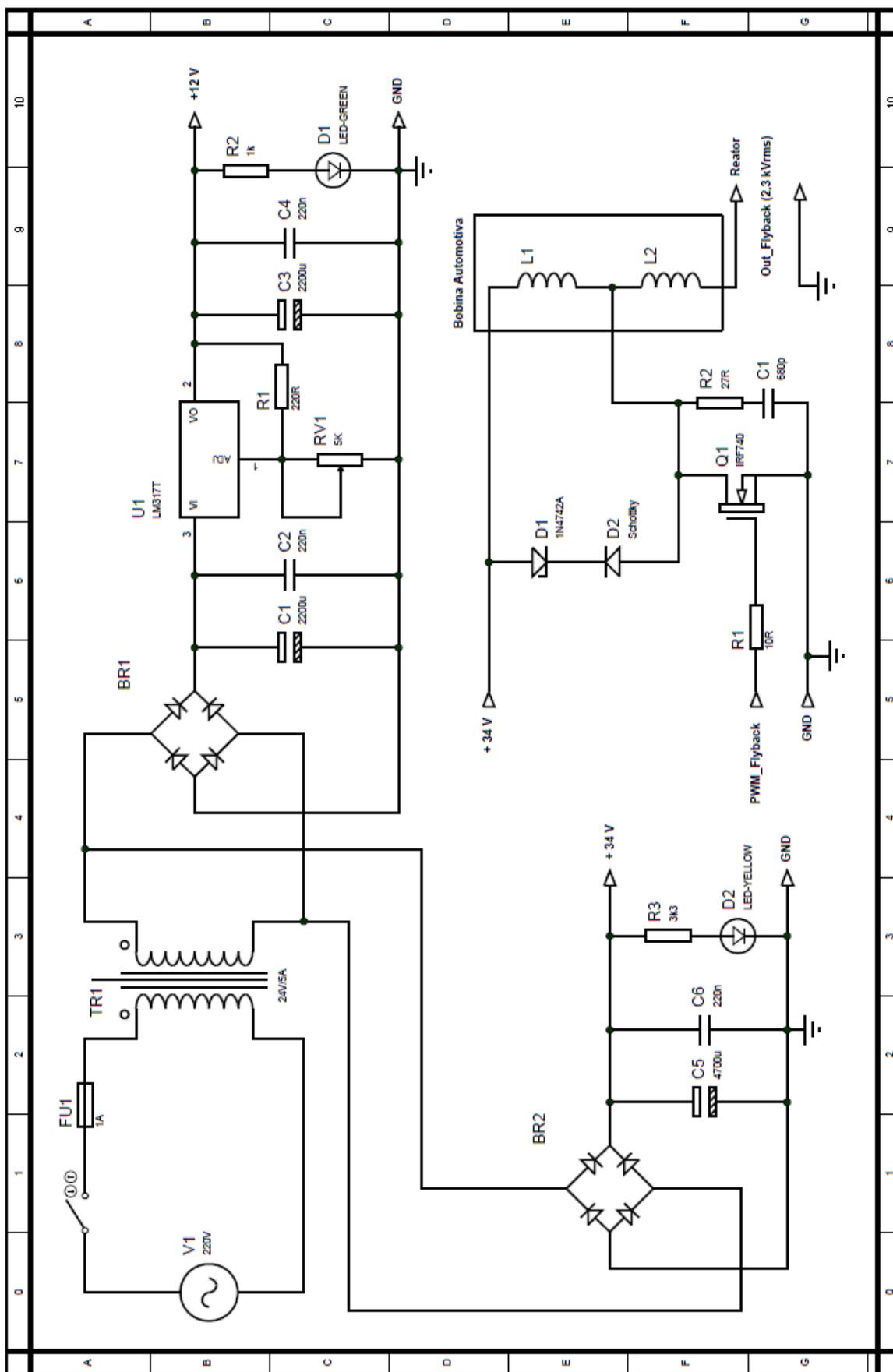
U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Wastewater technology fact sheet: ozone disinfection*, 1999.

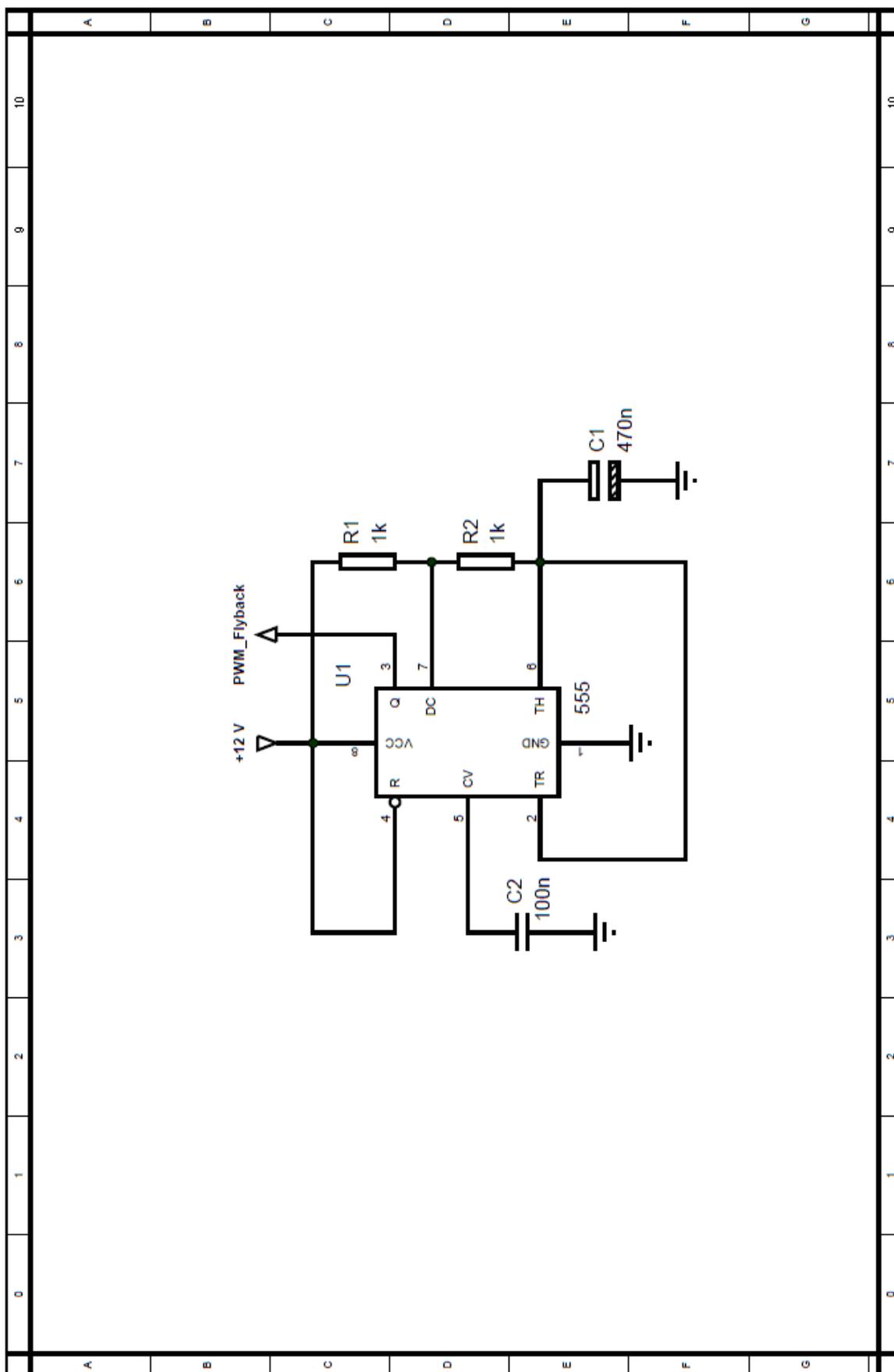
VAN BRUNT, R. J.; *Physics and chemistry of partial discharge and corona*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v.1, n.5, p.761-784, 1994.

VALDAMERI, A.; *Construção de um gerador de ozônio microcontrolado para tratamento de água*. Trabalho de integração, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

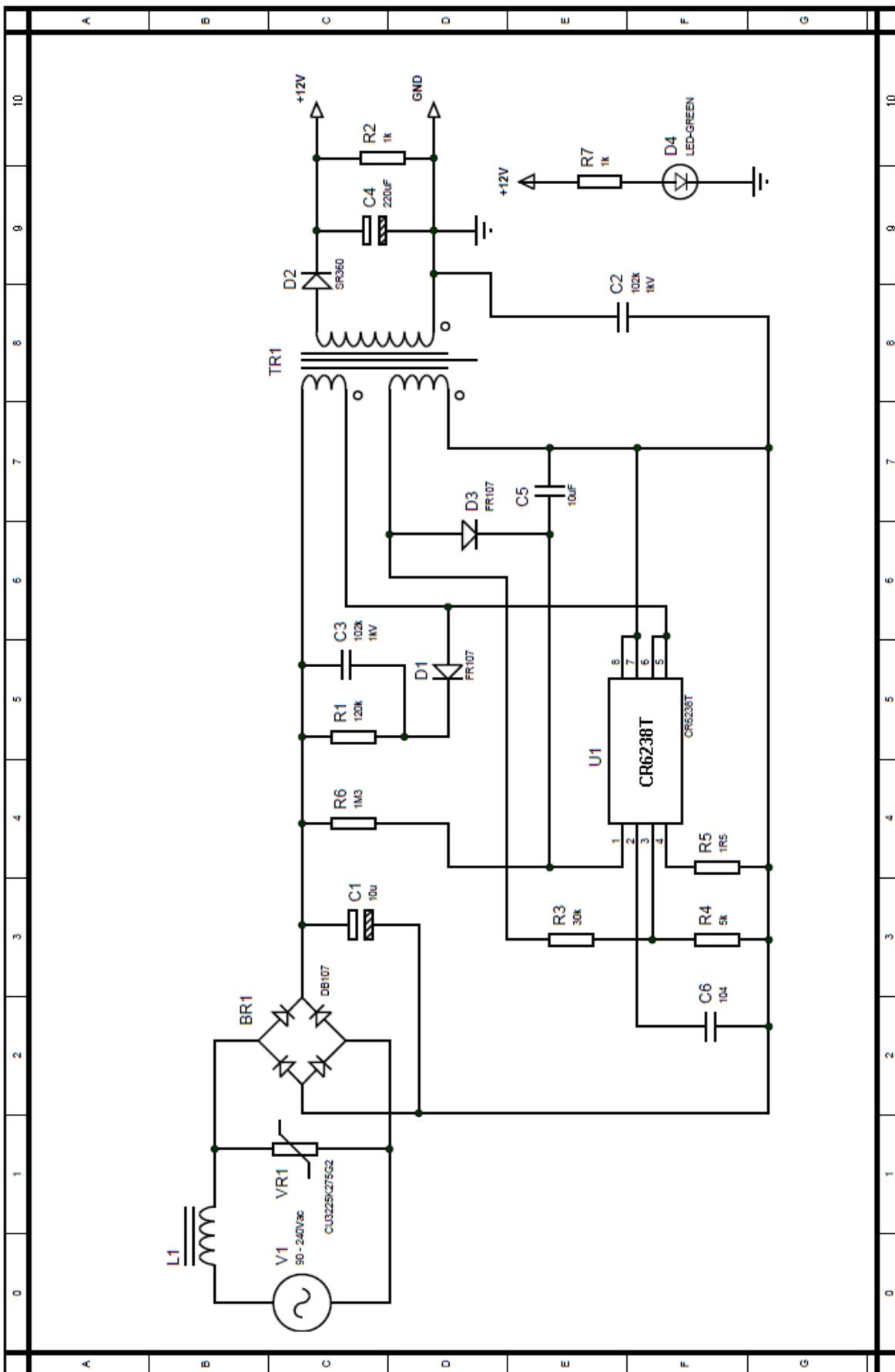
ANEXOS

ANEXO 1: Esquema elétrico da etapa de potência do gerador convencional.

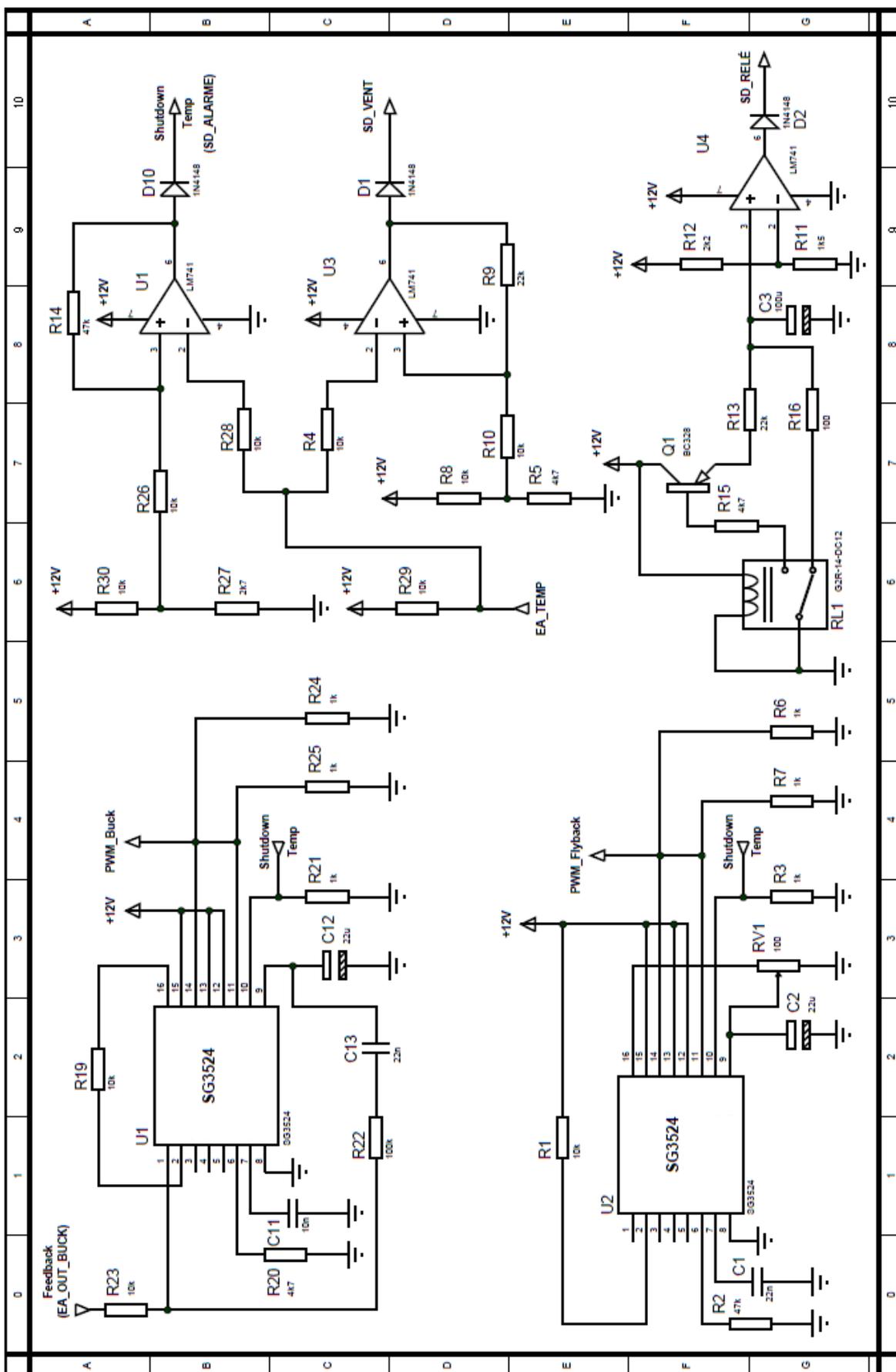


ANEXO 2: Esquema elétrico da etapa de controle do gerador convencional.

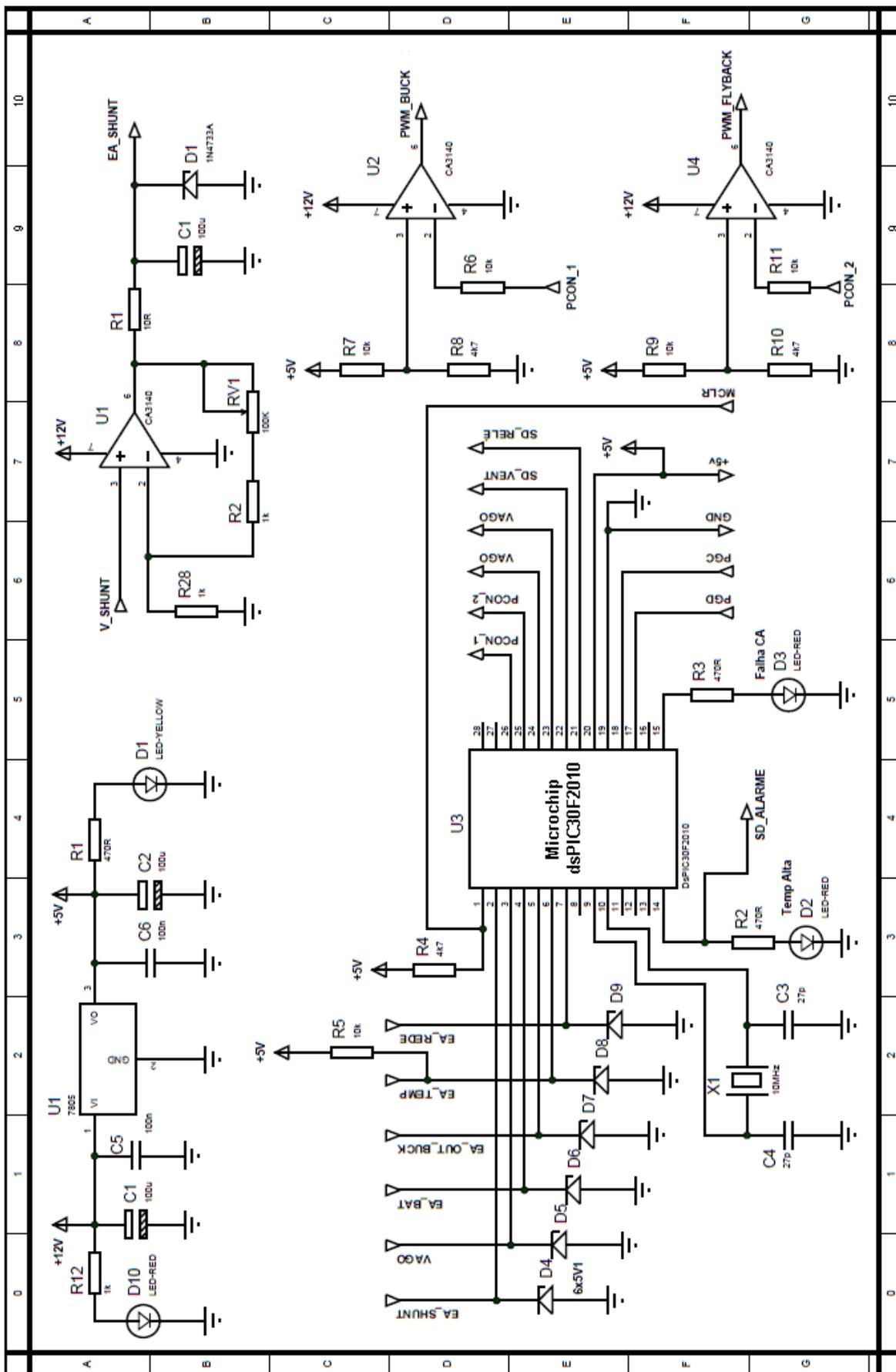
ANEXO 4: Esquema elétrico do conversor CA/CC – Fonte auxiliar.

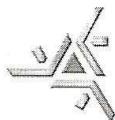


ANEXO 5: Esquema elétrico da etapa de controle analógico.



ANEXO 6: Esquema elétrico da etapa de controle digital.



ANEXO 8: Declaração de pedido de patente.

Universidade Estadual de Maringá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Divisão de Propriedade Intelectual

**DECLARAÇÃO Nº. 004/2012-PTL**

Declaramos, para os devidos fins, que **GILSON JUNIOR SCHIAVON** consta como inventor no pedido de patente "*Sistema Gerador de Ozônio Modular em Alta Freqüência, Automático, Operando com Controlador Digital de Sinais (DSC) e Controlador PID*", depositado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) em 09/03/2012, sob protocolo nº. 015120000492.

Maringá, 01 de junho de 2012



Rejane Sartori

Chefe da Divisão de Propriedade Intelectual.