

JOSÉ GILBERTO ARMAROLI

*NOVA ABORDAGEM DE OZONIZADORES PARA
TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO POR
DESCARGA CORONA*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof.Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos,

2007

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa, Ana Luiza, e aos meus
queridos filhos, Ana Clara e Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela excelente orientação, pela atenção dispensada, incentivo, compreensão e amizade em todos os momentos;

Ao Professor Dr. Luiz Antônio Daniel pela colaboração durante o período de pesquisa;

Ao Ruiberto da oficina eletromecânica pela grande ajuda no desenvolvimento dos equipamentos deste trabalho.

Ao Eng. Nathanael Silva Jr, pelo incentivo e apoio na realização deste trabalho;

À SABESP (Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) pela oportunidade de crescimento profissional;

Aos amigos e colegas da pós-graduação: Jaqueline, Denis, Rui Altafim filho, Ricardo dentre outros, pela amizade e auxílio valiosos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de algum modo colaboraram durante a minha permanência nesta Universidade.

Ao amigo Ênio Carlos, pelo estímulo e apoio;

À minha esposa Ana Luiza, pelo seu amor, carinho, incentivo e compreensão sempre;

Aos meus pais, Devanir e Jacira, pelo total suporte e presença constante em minha vida;

À Deus, pela minha vida e família.

EPÍGRAFE

“Sob a direção de um forte general, não haverá jamais soldados fracos”

(Sócrates)

"Aquele que obtém uma vitória sobre outros homens é forte,
mas aquele que obtém uma vitória sobre si próprio é todo-poderoso".

(Lao-tsé)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE GRÁFICOS	xv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Processos de Desinfecção de Água e Esgoto	7
2.2 Histórico da geração de ozônio.....	9
2.2.1 O que é Ozônio.....	11
2.3 Método das Descargas Elétricas para Produção de Ozônio	12
2.3.1 Efeito Corona.....	13
2.3.2 Corona CC Negativo.....	13
2.3.3 Corona CC Positivo	19
2.3.4 Corona AC.....	23
2.3.5 Outros tipos de Descarga Corona	24
2.4 Sistemas Propostos de Geração de Ozônio	25
3 TRATAMENTO MATEMÁTICO	35
3.1 Introdução.....	35

3.2 Configuração geométrica do arranjo experimental.....	37
4 PROPOSTA DE TRABALHO	45
4.1 Introdução.....	45
4.2 Metodologia do Trabalho Proposto.....	46
4.3 Montagem Experimental.....	48
4.3.1 Montagem com eletrodo interno de um fio	49
4.3.2 Montagem com eletrodo interno de três fios	52
4.3.3 Medição da produção de ozônio	55
4.4 Procedimento de Trabalho	56
4.5 Apresentação e Análise dos Resultados	58
4.5.1 Montagem com eletrodo interno de 1 fio	58
4.5.2 Montagem com eletrodo interno de 3 fios	61
4.5.3 Análise dos resultados	69
5 CONCLUSÕES.....	75
5.1 Continuidade da Pesquisa.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO	85
ANEXO I : Titulação pelo método Iodométrico.....	86
ANEXO II: Medidor Venturi	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. máquina geradora de ozônio de Siemens	10
Figura 2. Frequência do pulso Trichel em duas escalas diferentes.....	15
Figura 3. Desenvolvimento de avalanches de elétron em descargas corona negativas	16
Figura 4. Desenvolvimento e geração de avalanches nas descargas corona positivas.	20
Figura 5. Sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext}	38
Figura 6. Plasma corona crescendo com o aumento da tensão.....	43
Figura 7. Diagrama esquemático: Processo Ozônio. (Adaptado: USEPA, 1999).....	46
Figura 8. Diagrama esquemático: sistema de ozonização proposto.	47
Figura 9. Diagrama esquemático: Montagem executada em laboratório.	48
Figura 10. Sistema de ionização com montagem completa para 01 e 03 fios.....	49
Figura 11. Montagem primeiro protótipo.....	50
Figura 12. Montagem real do sistema com eletrodo interno de 01 (um) fio.....	52
Figura 13. Reator de ozônio com eletrodo interno de três fios.	52
Figura 14. Diagrama unifilar para tensão AC, CC (positivo e negativo).	53
Figura 15. Montagem real do sistema a 03 (três) fios.	54
Figura 16. Capela de exaustão de gases	55
Figura 17. Fases do processo de titulação pelo método Iodométrico.....	57
Figura 18. Diagrama esquemático: montagem futura de sistema de ozonização.	79
Figura 19. Tubo Venturi	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características típicas dos principais métodos de desinfecção	9
Tabela 2. Potencial de oxidação dos principais oxidantes.....	12
Tabela 3. Rotâmetro: Conversão da leitura da vazão de kg/24h Cl ₂ para L/h Ar.....	57
Tabela 4. Resultados dos ensaios 1 a 4 com os respectivos parâmetros.	59
Tabela 5. Resultados dos ensaios 5 a 8 com os respectivos parâmetros.	59
Tabela 6. Resultados dos ensaios 9 a 12 com os respectivos parâmetros.	60
Tabela 7. Resultados dos ensaios 13 a 16 com os respectivos parâmetros.	60
Tabela 8. Resultados dos ensaios 1 a 4 com os respectivos parâmetros.	62
Tabela 9. Resultados dos ensaios 5 a 8 com os respectivos parâmetros.	62
Tabela 10. Resultados dos ensaios 9 a 12 com os respectivos parâmetros.	63
Tabela 11. Resultados dos ensaios 1 a 3 com os respectivos parâmetros.	64
Tabela 12. Resultados dos ensaios 4 e 5 com os respectivos parâmetros.	64
Tabela 13. Resultados dos ensaios 1 a 3 com os respectivos parâmetros.	65
Tabela 14. Resultados dos ensaios 4 a 6 com os respectivos parâmetros.	66
Tabela 15. Comparação dos resultados: Tensões AC, CC (-) e CC (+).	67
Tabela 16. Ozonizadores: Dados dos modelos comerciais e os da pesquisa.	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Características corona e ruptura em ponta-plano negativo no ar atmosférico.....	18
Gráfico 2. Curvas limiares dos vários modos de corona positivo e para ruptura de centelhas para um anodo tipo ponta e um catodo tipo placa.	22
Gráfico 3. Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada.....	24
Gráfico 4. Características de corona estabelecido e ruptura em ponta-plano, no ar: linha cheia: ponta positiva; linha tracejada: ponta negativa (raio de curvatura da ponta $r = 1\text{mm}$);.....	36
Gráfico 5. Variação da força do campo para corona estabelecido (E_c / δ) com δr para geometria cilindro coaxial no ar	41
Gráfico 6. Relação entre tensão de ruptura e raio interno em um sistema de cilindro coaxial	42
Gráfico 7. Produção Ozônio x Fornecedor.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWWA	American Water Works Association
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
LAT	Laboratório de Alta Tensão
PVC	Policloreto de Vinila
TP	Transformador de Potencial
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UR	Umidade Relativa
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultra Violeta
VARIAC	Variador de Tensão
VCA	Tensão Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	comprimento de onda
KV/cm	kilovolt por centímetro
KHz	kilokertz
ns	nanosegundo
ms	milisegundo
g/KWh	gramas por kilowatt hora
Kg/h	kilogramas por hora
W	watts
$M\Omega$	mega ohms
cm	centímetro
mm	milímetro
L/min	litros por minuto
L/h	litros por hora
VA	volt ampére
$mmHg$	unidade de pressão
ϕ_{in}	diâmetro interno
KV	kilovolts
AC	corrente alternada
CC	corrente contínua

Q	carga elétrica
A	área
U	tensão
g	gravidade
r	espaço intereletrodo
r_0	raio do cilindro interno
r_{ext}	raio do cilindro externo
V	fonte de tensão
V_0	tensão aplicada
\vec{D}	vetor deslocamento
E	campo elétrico
L	comprimento
ε	permissividade elétrica
V_b	tensão de ruptura completa
δ	densidade relativa
$^{\circ}C$	graus Centígrados
$^{\circ}K$	graus Kelvin
E_c	campo elétrico crítico
gO_3/h	gramas de ozônio por hora
gO_3/Wh	gramas de ozônio por watt hora
Vol	volume

RESUMO

ARMAROLI, J.G. (2007). **Nova abordagem de ozonizadores para tratamento de água e esgoto por descarga corona**. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

.Este trabalho traz como contribuição o início sistemático de estudos para o projeto e execução de ozonizadores dedicados a estações de tratamento de água e esgotos domésticos com tecnologia totalmente nacional. O objetivo é desenvolver um sistema que apresente custo reduzido de fabricação, implantação, manutenção e também boa eficiência na produção de ozônio. Equipamentos auxiliares para bombeamento e tratamento do ar não são necessários, além de ser possível a ampliação do sistema.

Devido ao caráter multidisciplinar, este trabalho aborda a problemática da geração de subprodutos danosos ao homem e ao meio ambiente pelo uso de desinfetantes tradicionais, bem como um processo alternativo de tratamento pelo emprego do ozônio. Após descrever os fenômenos físicos envolvidos no método das descargas corona, um tratamento matemático apresenta elementos para o projeto ótimo deste sistema. Contudo, para viabilizar o uso de materiais disponíveis no mercado, os valores adotados nos arranjos iniciais seguiram aproximadamente estas indicações. Os ensaios foram realizados e a produção de ozônio foi obtida por titulação iodométrica. Os primeiros resultados foram tabulados e comparados com valores informados pelos equipamentos de mercado. Sugestões de implantação em campo para trabalhos futuros são apresentadas.

Palavras-chave: Ozonizadores para tratamento de água e esgoto. Descarga corona. Geração de ozônio. Titulação.

ABSTRACT

ARMAROLI, J.G. (2007) **Water and wastewater treatment ozonizer with corona discharge- new approach** 2007. 92 f. Dissertation (Master's degree) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2007.

Studies for the project and execution of ozonizers dedicated to the wastewater and water treatment with total national technology were presented. The aim of this work consists of developing a system which minimize the manufacturing process, implementation and maintenance costs and also improves the ozone production efficiency. Accessory pumping equipments has been eliminated with the use of Venture's system to inject the ozone in liquid and air treatment has not been used to reduce costs. While this system loses efficiency with air no treatable, it allows a parallel and serial set-up to improve its performance. To Support this work, an extended bibliographical analyzes has been carried out, which due to its multi-discipline characteristic was separated into studies of the traditional disinfectant procedures, alternative ozone treatment and, the physical corona discharges phenomena. The two prototypes were developed and, their obtained with the iodometric titration method, was also compared with those of market equipments. These preliminary comparisons have shown that these prototypes have a good performance inclusive with one of them having an ozone production superior than one of market equipments. Suggestions of implantation in field and other improvements for future work are also presented.

Key-Words: Ozonizer for water and wastewater treatment. Corona discharge. Ozone generation. Titration.

1 INTRODUÇÃO

Aplicações do fenômeno das descargas elétricas corona, em sistemas industriais e em especial em geradores de ozônio (ozonizadores) dedicados ao tratamento de água e esgotos domésticos, objeto deste trabalho, podem ser vistos a partir do final do século XIX. No início, principalmente na Europa, seu uso foi muito difundido, mas o elevado custo de instalação e operação e a baixa eficiência de produção foram fatores limitantes para sua expansão.

Tratamentos químicos com cloro tornaram-se mais promissores e hoje, este produto consiste no agente químico mais usado na desinfecção de águas e efluentes, sendo empregado em quase 80% das estações mundiais (GONÇALVES, 2003).

Entretanto, a preocupação crescente com o meio ambiente, principalmente a respeito dos subprodutos gerados das reações do cloro com a matéria orgânica (orgânicos clorados), 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 forte alternativa de tratamento, promovendo a retomada de pesquisas de

tecnologia em geração e a consequente operação econômica. (GOGATE; PANDIT, 2003; ORNELAS, 2004; ASSIRATI, 2005).

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 (GONÇALVES, 2003).

Recentemente, novos estudos estão em desenvolvimento a cerca da desinfecção de hormônios sexuais femininos (anticoncepcionais), perturbadores endócrinos e toxinas utilizando o ozônio. Estas substâncias são liberadas no meio ambiente e nenhum tratamento de água convencional consegue eliminá-las e não há muitos estudos científicos procurando detectar os efeitos dessas drogas diluídas na água sobre a saúde da população.

Neste trabalho pretende-se criar subsídios para o desenvolvimento e aprimoramento de ozonizadores em sistemas de tratamento de água e esgotos sanitários com as seguintes características:

- possuir baixos custos de fabricação e implantação, com tecnologia nacional;
- ter exeqüibilidade singela;
- possuir fácil manutenção;

- ser isento de equipamentos auxiliares para bombeamento e de tratamento do gás de alimentação;
- apresentar produção de ozônio com eficiência;
- estar diretamente conectado de forma co-corrente à tubulação do sistema de esgoto ou tratamento de água e,
- permitir ampliação do sistema.

Características estas não encontradas simultaneamente nos sistemas convencionais.

Para abordar essa problemática, de caráter multidisciplinar, a pesquisa bibliográfica procurou dar uma visão abrangente da maioria dos fenômenos e métodos diretamente relacionados, tanto na área de descargas elétricas como dos principais agentes físico-químicos utilizados em sistemas de tratamento de água e de esgoto doméstico, tratados no capítulo 2. Este capítulo foi estruturado em quatro subtópicos melhor descritos nos parágrafos subseqüentes:

Processos de desinfecção, tópico em que são apresentados os principais agentes de desinfecção utilizados em sistemas de tratamento de água e esgotos, ou seja, os químicos como cloro, ozônio, dióxido de cloro e os físicos como a radiação ultravioleta e radiação solar;

Histórico da geração de ozônio, tópico que aborda uma breve revisão cronológica, desde a invenção do primeiro ozonizador até o seu uso nos dias de hoje para tratamento de água e efluentes, bem como as principais características deste gás;

Método Corona, tópico dedicado à geração de ozônio, no qual utilizando a normalização técnica, define-se a correta terminologia da área e também apresenta uma revisão teórica dos fenômenos físicos envolvidos.

Sistemas propostos de geração de ozônio, tópico onde uma revisão dos principais trabalhos referentes às metodologias propostas para a geração de ozônio é descrita.

No capítulo 3, Tratamento matemático, será apresentada uma introdução dos principais parâmetros que interferem na geração da descarga corona no ar para uma configuração de eletrodos tipo cilindros coaxiais. Este tratamento fornece elementos para o projeto ótimo de um sistema coaxial para produção de descargas corona. Neste trabalho, contudo, os valores adotados no protótipo inicial, seguiram aproximadamente as indicações deste tratamento teórico, visando com isso empregar tubos facilmente encontrados no mercado e, conseqüentemente, reduzir custos finais.

No capítulo 4, Proposta de trabalho, é apresentada uma introdução do processo de ozonização industrial, a metodologia do trabalho proposto, a descrição da montagem de dois arranjos experimentais testados em laboratório e as características dos principais dispositivos utilizados. A seguir, sob a forma de tabelas e gráficos, são apresentados os resultados preliminares dos primeiros ensaios, além de uma tabela comparando estes dados com os fornecidos por ozonizadores comerciais.

As Conclusões sobre este trabalho, as observações gerais sobre a metodologia aplicada, as principais contribuições desta pesquisa e sugestões para estudos futuros são apresentadas no capítulo 5.

No anexo é apresentado o processo de titulação pelo método iodométrico e o cálculo da vazão pelo medidor Venturi.

Cabe ainda ressaltar como uma das principais contribuições deste trabalho, o início sistemático de estudos para o projeto e execução de ozonizadores dedicados a estações de tratamento de água e esgotos domésticos.

2 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Para o melhor entendimento desta pesquisa, que tem um caráter multidisciplinar, este capítulo pretende fornecer uma visão abrangente dos principais agentes físico-químicos utilizados em sistemas de tratamento de água e de esgoto doméstico e o método das descargas elétricas (efeito corona) para produção de ozônio. Segue também, uma breve revisão sobre o histórico da geração de ozônio e dos principais estudos sobre sistemas propostos para geração de ozônio.

2.1 Processos de Desinfecção de Água e Esgoto

Os métodos mais conhecidos para desinfecção de água e esgotos podem ser categorizados de acordo com a natureza da operação do processo de tratamento e são subdivididos em dois grupos:

- Por meio de agentes químicos: cloro, ozônio, dióxido de cloro, hipoclorito de sódio, permanganato de potássio, a mistura ozônio/peróxido de hidrogênio, etc.
- Por meio de agentes físicos: radiação ultravioleta, radiação solar, fotocatalise heterogênea.

A função principal do processo utilizando agentes químicos na desinfecção é o controle de doenças veiculadas por meio híbrido e a inativação de organismos patogênicos na potabilização das águas. Isto tem proporcionado uma melhora considerável na qualidade do meio ambiente e de vida das pessoas (DANIEL, 2001).

A maioria destes agentes são potentes oxidantes e podem ser usados em estações de tratamento de água, no controle de gosto, odor e limpeza de filtros. Pesquisas recentes têm mostrado que muitos destes agentes geram subprodutos de desinfecção potencialmente cancerígenos e que podem trazer danos aos seus consumidores e ao meio ambiente. O monitoramento desses subprodutos e a escolha correta do desinfetante são procedimentos que minimizam seus efeitos (DANIEL, 2001).

O emprego da técnica de tratamento que utiliza agentes físicos foi motivado pela pesquisa de métodos de desinfecção alternativos aos produtos químicos, principalmente o cloro, e também para minimizar a formação de subprodutos cancerígenos. Além disso, devido às leis ambientais estarem cada vez mais restritivas quanto à produção de poluentes, novas tecnologias estão em desenvolvimento, tendo por objetivo a redução destes resíduos e também visando à relação custo-benefício.

A seguir, é apresentada a Tabela 1 onde são comparados alguns agentes químicos e físicos usados em desinfecção, mostrando as principais vantagens e desvantagens de cada um.

Tabela 1. Características típicas dos principais métodos de desinfecção

Características	Cloro Gasoso	Ozônio	Radiação Ultravioleta
Custo de implantação	Menor	Elevado	Elevado
Custo de operação	Menor	Elevado	Elevado
Eficiência de desinfecção	Elevada	Elevada	Elevada
Geração de subprodutos	Organoclorados possíveis	Não Esperados	Não
Tempo de contato	Longo	Moderado	Curto
Efeito bactericida	Bom	Bom	Bom
Efeito virucida	Ruim	Bom	Bom
Grau mínimo de tratamento	Primário	Secundário	Secundário
Remoção de Cor	Moderada	Sim	Não
Corrosividade	Elevada	Elevada	Não
Riscos operacionais	Elevados	Moderados	Não

Fonte: Adaptado (CHERNICHARO, 2001; GONÇALVES, 2003).

2.2 Histórico da geração de ozônio

Em 1785, M.V. Marum¹ foi o primeiro a detectar um odor característico no ar quando centelhas eram produzidas nos seus experimentos com uma máquina eletrostática em alta tensão, sem, contudo, identificar o gás gerado.

Em 1840, C.H. Schönbein² também detectou o mesmo odor estranho no oxigênio liberado durante a eletrólise de uma água acidulada e classificou o gás resultante com o nome de Ozônio.

Já em 1857, E.W.V. Siemens³ construiu a primeira máquina geradora de ozônio descrita na Figura 1. A mesma consistia de dois tubos de vidro concêntricos.

1 Martinus Van Marum: Químico Holandês (1750-1837)

2 Christian Friedrich Schönbein: Químico Alemão (1799-1868)

3 Ernst Werner von Siemens: Engenheiro Alemão (1816-1892)

O tubo interno tinha uma folha de alumínio fina cobrindo sua superfície interna e o tubo externo era identicamente coberto em sua superfície externa (<<http://www.lateralscience.co.uk/marum/index.html>>. Acesso em 15 de janeiro de 2007.)

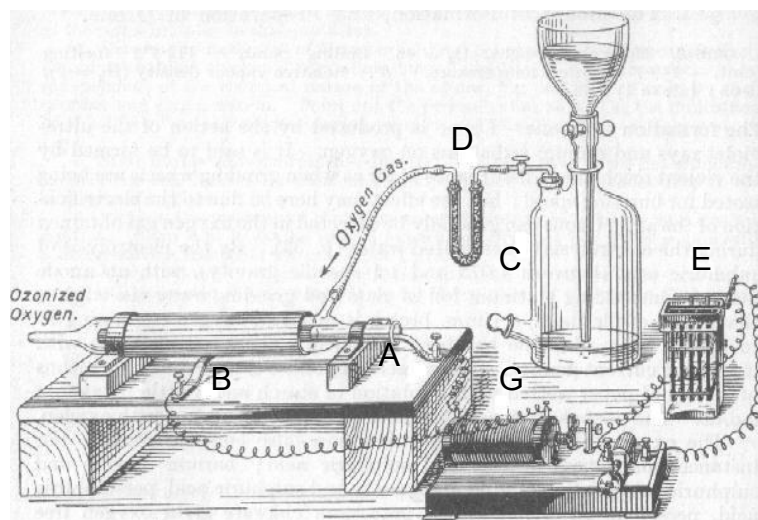


Figura 1. máquina geradora de ozônio de Siemens
(Fonte: www.lateralscience.co.uk/marum/index.html: acessado em 15/01/07).

Abaixo são relacionados os acessórios de interligação conforme nomenclatura da Figura 1:

- A - terminal conectado à superfície interna;
- B - terminal conectado à superfície externa;
- C – recipiente de armazenamento de gás contendo oxigênio;
- D - tubo secante com cloreto de cálcio;
- E – bateria;
- G - bobina de indução.

Quando se aplicava uma tensão elevada entre os terminais A-B, fornecida pelo circuito da fonte E-G, a área entre os dois tubos de vidro tornava-se ionizada.

No mesmo instante, um gás contendo oxigênio e mantido no recipiente C era injetado no secador D até atingir o espaço intereletrodo. Então, o ar ionizado neste local provocava a quebra das moléculas de oxigênio resultando na sua ruptura. Assim, alguns átomos de oxigênio recombinavam e transformavam-se em ozônio.

No ano de 1886, após experimentos realizados, verificou-se que o ozônio era um excelente germicida. Assim, a partir de 1893, o ozônio foi pela primeira vez testado numa estação de tratamento de água em Oudshoorn, Holanda.

A partir desta data até o presente momento, já são mais de 1000 estações instaladas em todo o mundo.

2.2.1 O que é Ozônio

O Ozônio é um gás de composição molecular (O_3). Ele se forma naturalmente na atmosfera quando moléculas de oxigênio (O_2), na presença de radiação ultravioleta ($\lambda < 180\text{nm}$) ou de descargas elétricas corona, rompem-se e os átomos separados combinam-se individualmente com outras moléculas de oxigênio.

Industrialmente, o ozônio pode ser produzido por três técnicas: exposição ultravioleta do oxigênio, eletrólise do ácido perclórico e descarga elétrica (BALAKRISHNAN;ARUNAGIRI;RAO, 2002), sendo esta última a mais usada e que será motivo de estudo deste trabalho.

O ozônio pode variar de incolor a azulado e tem um odor característico. Sua principal característica é ser um agente com alto poder de desinfecção e oxidação perdendo apenas para o flúor e o radical hidroxila. Isto lhe confere grande rapidez na desinfecção. A Tabela 2 mostra o potencial de oxidação dos principais oxidantes.

Comparado ao cloro, é cerca de 10 vezes mais desinfetante e 3.000 vezes mais rápido na inativação de bactérias.

Tabela 2. Potencial de oxidação dos principais oxidantes.

Oxidante	Potencial de Oxidação (V)
Flúor (F ₂)	3.03
Radical Hidroxila (OH [*])	2.80
Ozônio (O₃)	2.07
Peróxido de Hidrogênio (H ₂ O ₂)	1.78
Dióxido de Cloro (ClO ₂)	1.50
Cloro (Cl ₂)	1.36

Fonte: Adaptada (GRABOWKI, 2006; LUKES, 2001; MALIK, M.A.; GHAFAR e MALIK, S.A., 2001)

Outra característica marcante é ser um gás altamente instável, é extremamente reativo com outras substâncias. Assim, pode ser considerado como uma "substância química limpa", porque se deteriora sem deixar resíduos danosos ao meio ambiente. Além disso, seu uso não implica em nenhum transporte ou armazenamento perigoso, porque o ozônio é sempre produzido no local de uso e a uma taxa ao qual é necessário (ELIASSON; KOGELSCHATZ, 1991).

Estas características tornam o uso do ozônio bastante atrativo em estações de tratamento de água e esgotos domésticos.

2.3 Método das Descargas Elétricas para Produção de Ozônio

O método mais eficiente e usado para se produzir ozônio em escala industrial é pela descarga corona provocada por um alto campo elétrico aplicado que ioniza o espaço entre dois eletrodos metálicos. O espaço intereletrodo é separado por uma barreira dielétrica que evita a descarga completa.

Formas diferentes de descarga corona podem ocorrer dependendo da frequência e polaridade do campo (AC, 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 2.3.2 a 2.3.5 uma breve revisão do fenômeno físico envolvido no processo de descarga e sua relação com a produção de ozônio será apresentada.

2.3.1 Efeito Corona

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.

2.3.2 Corona CC Negativo

Primeiramente, alguns mecanismos de ionização presentes neste processo serão examinados. Considerar dois eletrodos tipo fio-cilindro dispostos de forma coaxial. Uma alta tensão CC negativa é aplicada no eletrodo catodo (fio de diâmetro

pequeno) e o eletrodo anodo (cilindro de diâmetro grande) é aterrado. Faz-se passar pelo espaço intereletrodo um gás de característica eletronegativa⁴.

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 inelásticas⁵ com moléculas neutras do gás (MUKKAVILLI et al. 1988).

Neste intervalo, se a energia do elétron for suficientemente alta, pode ocorrer a ionização⁶ 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 eletrodo 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).

4 Gás que tem afinidade na troca de elétrons.

5 Há troca de energia entre partículas que se chocam.

6 Formação de pares de íons, o negativo (elétron livre) e o positivo (átomo sem um de seus elétrons).

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 2 mostra em duas escalas diferentes, a relação entre a frequência do pulso Trichel com a tensão aplicada.

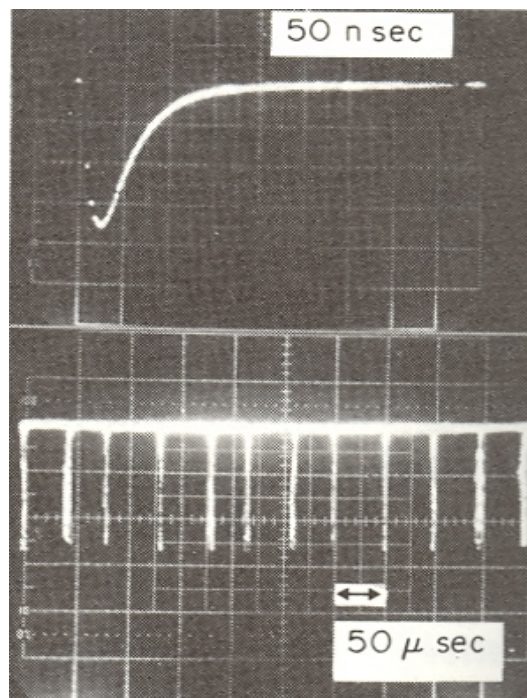


Figura 2. Frequência do pulso Trichel em duas escalas diferentes.
(Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984).

O mecanismo físico da descarga corona sob tensão CC negativa será investigado através da Figura 3.

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

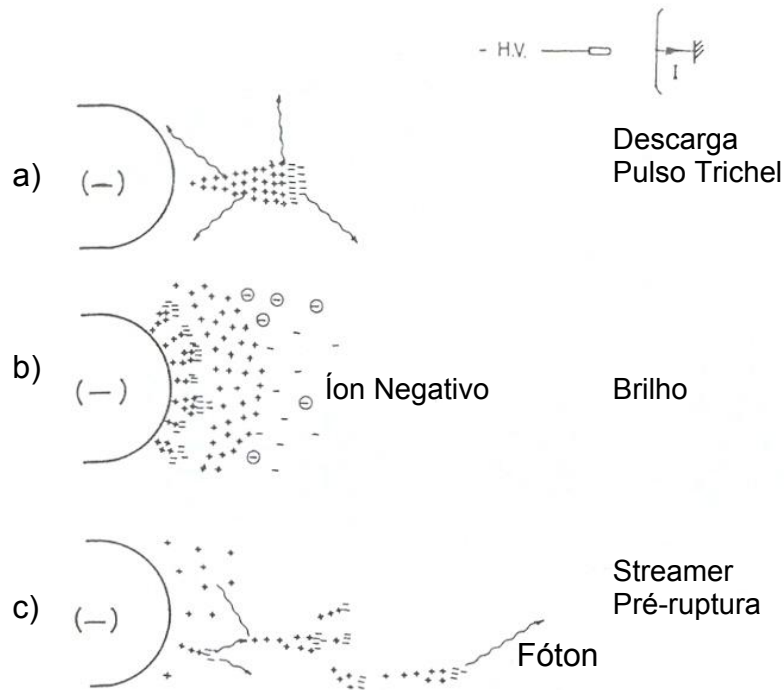


Figura 3. Desenvolvimento de avalanches de elétron em descargas corona negativas (Fonte: ABDEL-SALAM et al., 2000).

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

Na Figura 3-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 fotoemissão do eletrodo de descarga e a fotoionização do próprio gás. (CHEN; 2000).

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 3-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 3-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*⁷. 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 no Gráfico 1 no qual curvas características de descarga corona e ruptura para uma configuração ponta-plano negativo no ar atmosférico são apresentadas.

⁷ Canais de ionização provocados por avalanches de elétrons.

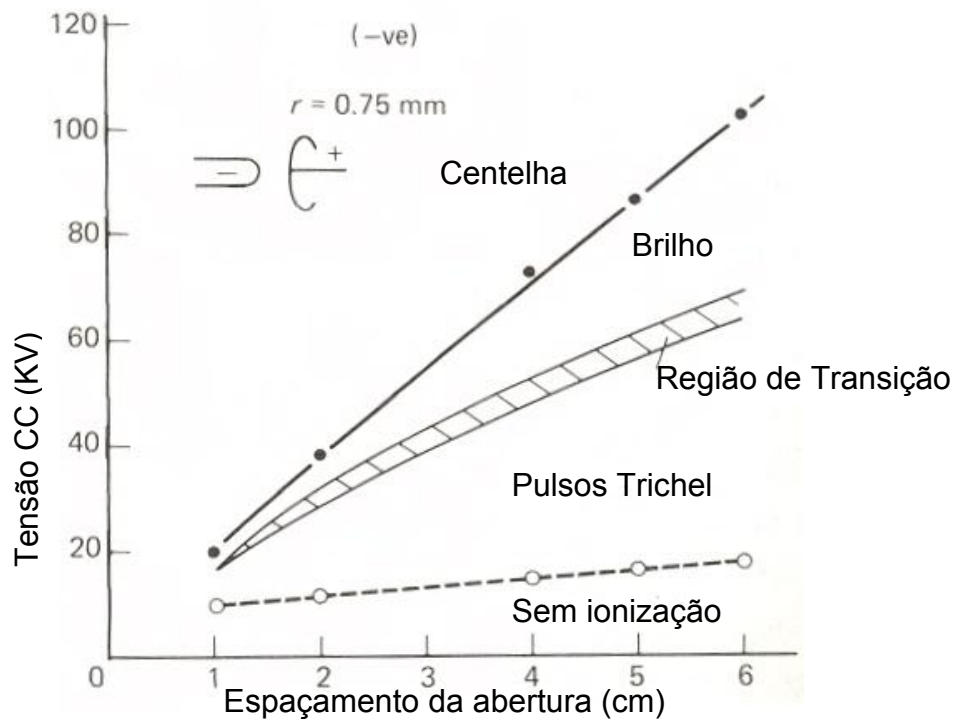


Gráfico 1. Características corona e ruptura em ponta-plano negativo no ar atmosférico (Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984).

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 um 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. Como o processo aqui se realiza de maneira mais estável, esta será a região de trabalho nos ensaios. Como exemplo, no Gráfico 1, considerar o ponto de interseção entre os pontos 20KV e 3 cm. Nesta configuração, já se tem a ocorrência de Pulso Trichel, ou seja, com este campo (6KV/cm) já é possível trabalhar na região de descarga estabilizada.

Portanto, a partir destes estudos e do Gráfico 1, conclui-se que esta região será útil para este projeto e para o dimensionamento do espaçamento porque de acordo com as distâncias, se aumentar demais a tensão, é necessário aumentar o espaçamento. Como o objetivo deste trabalho é investigar um modelo de ozonizador para operar com a máxima eficiência e baixo custo na produção de ozônio para tratamento de água e esgoto, assim parâmetros como nível de tensão aplicada, polaridade e espaçamento da abertura serão analisados, de maneira a se obter um ponto ótimo de funcionamento dentro desta região.

2.3.3 Corona CC Positivo

O mecanismo físico da descarga corona sob tensão CC positiva será investigado através da Figura 4.

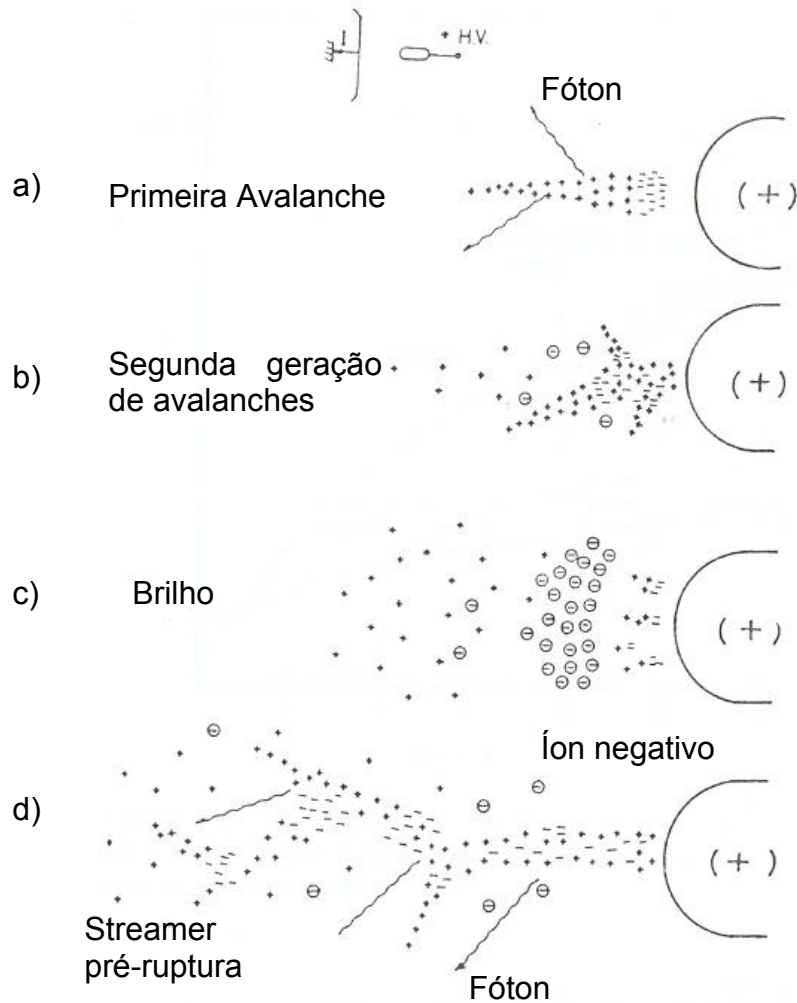


Figura 4. Desenvolvimento e geração de avalanches nas descargas corona positivas.
(Fonte: ABDEL-SALAM et al., 2000)

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 4-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 4-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 4-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 4-d. (KUFFEL; ZAENGL, 1984; ABDEL-SALAM et al., 2000; GALLO, 1977).

A representação gráfica dos fenômenos físicos ocorrentes neste arranjo pode ser verificada no Gráfico 2, onde curvas características de descarga corona e ruptura, para uma configuração ponta-plano positivo no ar atmosférico, são apresentadas.

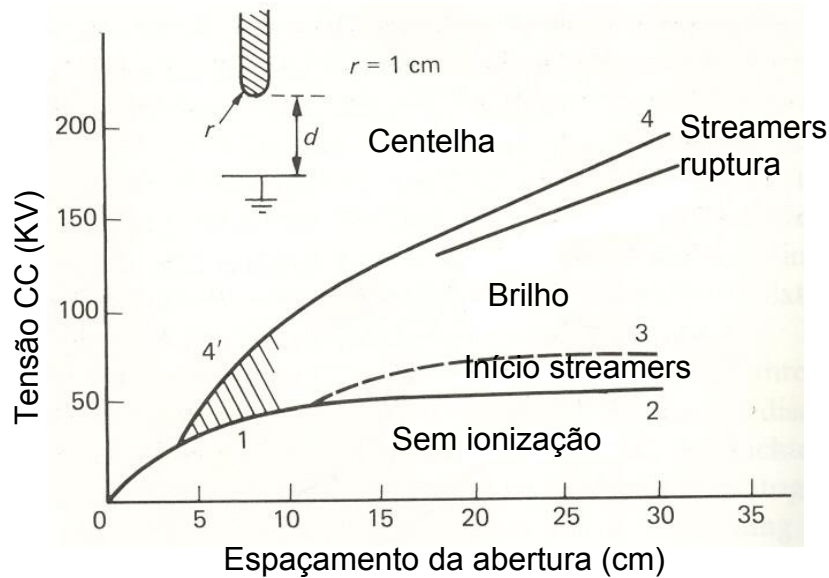


Gráfico 2. Curvas limiares dos vários modos de corona positivo e para ruptura de centelhas para um anodo tipo ponta e um catodo tipo placa.
(Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984)

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 freqüentes. 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 os Gráficos 1 e 2, observa-se 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 se controlar, ocorrendo freqüentemente a ruptura. Desta forma, a produção de ozônio sob polaridade positiva apresenta uma menor eficiência comparado à polaridade negativa.

2.3.4 Corona AC

A divergência básica entre a geração de corona sob tensão AC e a tensão CC está na mudança periódica da direção do campo aplicado sob tensão AC 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 os Gráficos 1 e 2 e 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 AC, a ruptura ocorre obrigatoriamente durante o semi-ciclo positivo da onda

de tensão (KUFFEL; ZAENGL, 1984). Desta forma, conforme indicado esquematicamente no Gráfico 3, a geração de ozônio será mais intensa no semi-ciclo negativo do que no semi-ciclo positivo.

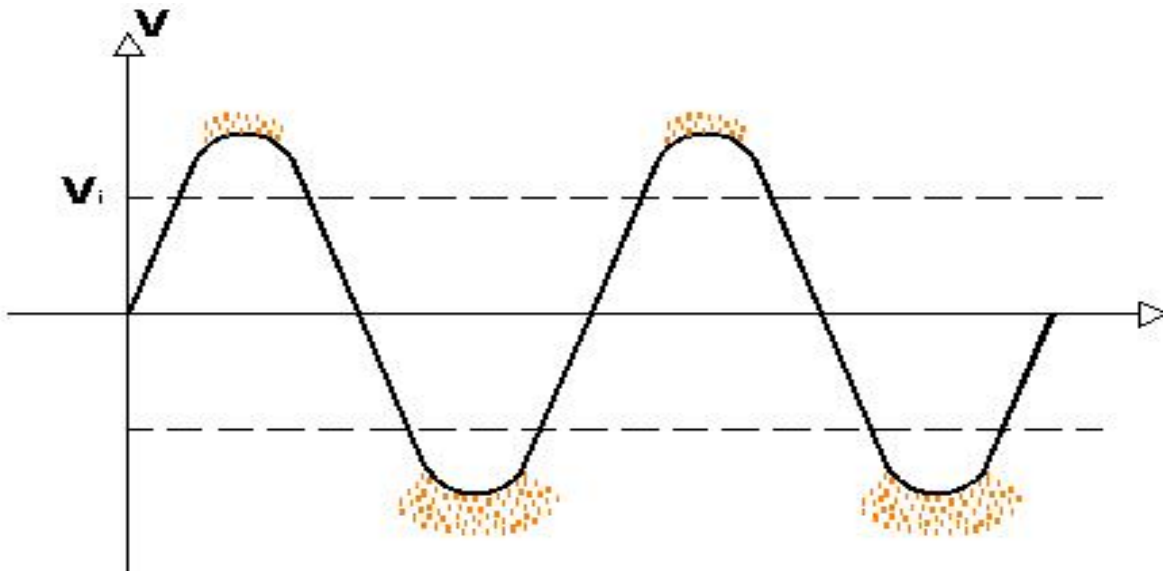


Gráfico 3. Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada.

Comparando os fenômenos ocorrentes sob tensão AC e CC negativa e positiva, verifica-se que a descarga corona sob polaridade negativa é mais fácil de se 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 AC com valores intermediários entre estas polaridades.

2.3.5 Outros tipos de Descarga Corona

Outra possibilidade de se gerar descargas corona com maior eficiência é através 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 (60Hz) usadas tradicionalmente. Entretanto, este sistema não se encontra no escopo desta dissertação.

2.4 Sistemas Propostos de Geração de Ozônio

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 multi-agulhas 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 à terra por meio de um micrômetro 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) propuseram neste trabalho, um projeto de gerador de ozônio onde estudou 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 taxa de fluxo 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 50Hz sendo usados pulsos de 40ns de duração numa faixa de tensão de 15KV a 50KV. 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 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 40ns para cada ciclo, estão na mesma ordem dos geradores convencionais de tamanho similar operando em 50Hz, a duração da descarga está em torno de 4ms. 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 40KV. Finalmente, concluíram que há uma vantagem considerável em se usar pulsos de duração curta em lugar de senoides 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 taxa de fluxo 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 taxas de fluxo 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 0.04W.

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 – através 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 18KV em frequência nominal 60Hz 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 A. e Goldman M. (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 μ m e comprimento de 8cm e estava instalado axialmente no centro do cilindro. O cilindro era um disco de 8cm 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 $25M\Omega$.

As experiências foram realizadas com ar purificado, isento de contaminantes específicos, a temperatura e umidade controladas, com diferentes materiais de eletrodo (cobre, alumínio e aço inoxidável) e aplicadas tensões positiva, negativa e alternada (50Hz). 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 através 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 0.1mm 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 anódica intermediária apropriadamente controlada, torna-o particularmente adaptado para desinfecção de sistemas de água limpa.

Malik, M.A., Ghaffar e Malik, S.A. (2001) descreveram neste trabalho, na área de tratamento de água e esgotos, 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.

3 TRATAMENTO MATEMÁTICO

Neste capítulo, 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.

3.1 Introdução

Foi visto no Capítulo 2 que em espaçamentos com campo muito distorcido, o surgimento do primeiro *streamer* pode estabelecer uma atividade corona que estabiliza o espaçamento ou conduz diretamente a ruptura.

Se uma ou outra condição ocorre, depende 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, o Gráfico 4 compara as características de corona estabelecido e ruptura em um espaçamento tipo ponta-plano positivo e negativo, medidas no ar em função da pressão do gás.

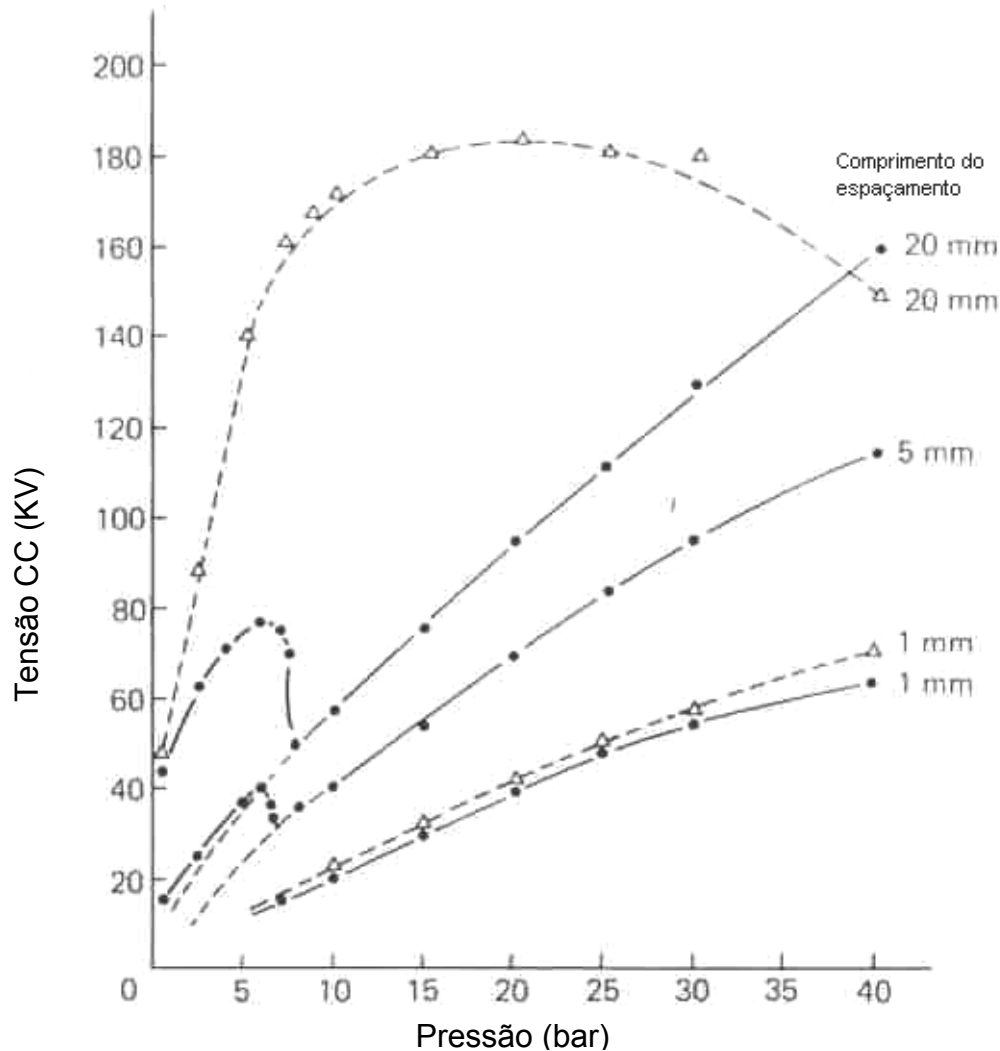


Gráfico 4. Características de corona estabelecido e ruptura em ponta-plano, no ar: linha cheia: ponta positiva; linha tracejada: ponta negativa (raio de curvatura da ponta $r = 1\text{ mm}$); (Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984).

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 estabelecido. 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.

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 .

Neste trabalho, os principais fatores que interferem na manutenção de uma descarga corona estabilizada serão discutidos. Parâmetros como grau de distorção do campo, taxa de fluxo do gás e polaridade da tensão aplicada, serão melhor discutidos no capítulo 4 quando da realização dos testes experimentais. O gás a ser utilizado será o ar atmosférico e a pressão será a ambiente. A umidade e a temperatura também serão examinadas aqui.

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

3.2 Configuração geométrica do arranjo experimental

Uma prática geometria para campo não uniforme e que freqüentemente é usada na construção de dispositivos de alta tensão é o arranjo cilindros coaxiais. 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).

Considerar, inicialmente, um sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext} , respectivamente, conforme a Figura 5 onde o campo elétrico pode ser calculado a partir da tensão aplicada como mostrado a seguir:

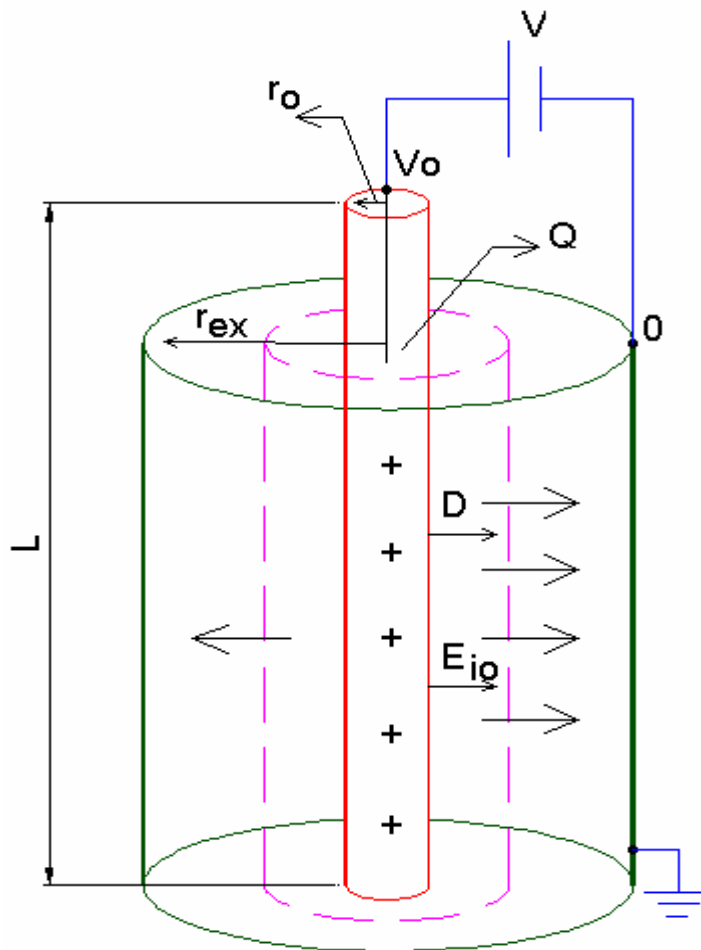


Figura 5. Sistema de dois cilindros coaxiais com raios interno e externo r_0 e r_{ext} .

V é a fonte, V_0 a tensão aplicada, E é o campo elétrico, Q é a carga, r_0 é o raio do cilindro interno e r_{ext} o raio do cilindro externo e L é o comprimento do cilindro interno.

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

$$V_0 = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.1)$$

e, pela Lei de Gauss:

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{l} = Q \quad (3.2)$$

onde \vec{D} é o vetor deslocamento e é dado pela seguinte expressão:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

onde ε é a permissividade elétrica. Introduzindo (3.3) em (3.2) e integrando:

$$\varepsilon \vec{E}(r) \cdot 2\pi r \cdot l = Q \quad \Rightarrow \quad E(r) = \frac{Q}{2\pi r \cdot l \cdot \varepsilon} \quad (3.4)$$

Então, introduzindo (3.4) em (3.1) e integrando novamente tem-se:

$$V_0 = -\int_{r_{ext}}^{r_0} \frac{Q}{2\pi \cdot r \cdot l \cdot \varepsilon} dr \quad \Rightarrow \quad V_0 = \frac{Q}{2\pi \cdot l \cdot \varepsilon} \ln \frac{r_{ext}}{r_0} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{V_0 \cdot 2\pi \cdot l \cdot \varepsilon}{\ln \frac{r_0}{r_{ext}}} \quad (3.5)$$

Introduzindo (3.5) em (3.4) obtém-se:

$$E(r) = \frac{\frac{V_0 \cdot 2\pi \cdot l \cdot \varepsilon}{\ln \frac{r_0}{r_{ext}}}}{2\pi \cdot r \cdot l \cdot \varepsilon}$$

Simplificando o termo do lado direito da equação acima tem-se finalmente:

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

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

Quando o nível de tensão no fio de diâmetro pequeno atingir o nível de ruptura (nomeado de E_b), corona estabilizado ou a ruptura completa ocorrerá na seqüência (KUFFEL; ZAENGL, 1984).

Então, na equação (3.6), fazendo a tensão aplicada ser igual a V_b teremos:

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

onde V_b é a Tensão aplicada para corona estabilizado ou ruptura completa.

O valor de E_b é obtido utilizando-se o Gráfico 5 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 (3.11), a equação de Zaengl e Nyffenegger (1974 apud KUFFEL; ZAENGL, 1984, p.366)⁸ e a equação de Schumann (1923 apud KUFFEL; ZAENGL, 1984, p.359)⁹. A expressão empírica desenvolvida por Peek (1920 apud KUFFEL; ZAENGL, 1984, p.366)¹⁰ para cálculo do campo crítico é dado por:

$$\frac{E_b}{\delta} = 31.53 + \frac{9.63}{\sqrt{\delta r}} \quad (3.11)$$

onde E_b é a força do campo para corona estabilizado 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 se observa, 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 3.10 a seguir:

$$\delta = 0.386 \frac{P}{(273 + t)} \quad (3.10)$$

8 ZAENG W.S.; NYFFENEGGER N.U. Proc.3rd int. conf. on gas discharges, 1974. p.303.

9 SCHUMANN W.O. Arch.fur electrotechnik, 1923. p.593..

10 PEEK F.W. Dielectric phenomena in high voltage engineering 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1920.

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 pelo Gráfico 5.

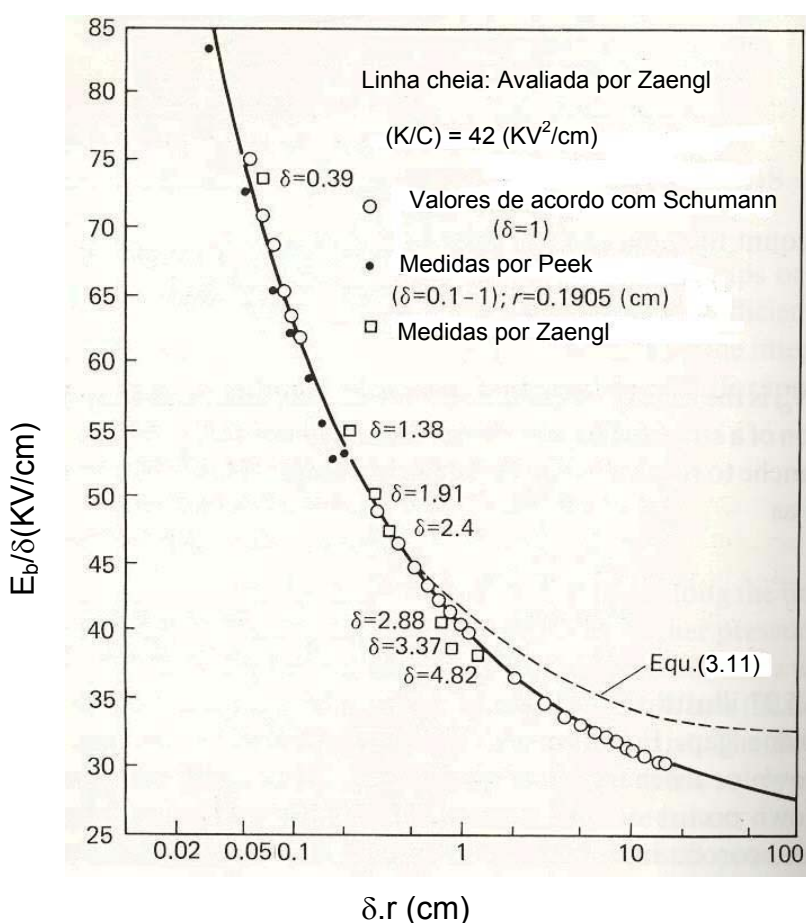


Gráfico 5. Variação da força do campo para corona estabelecido (E_c / δ) com δr para geometria cilindro coaxial no ar (Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984).

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:

$$\frac{dV_b}{dr_0} = E_b \left(\ln \frac{r_{ext}}{r_0} - 1 \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{r_{ext}}{r_0} = e \quad (3.8)$$

Substituindo (3.8) na equação (3.7) temos que:

$$(V_b)_{max} = E_b r_0 \quad (3.9)$$

O Gráfico 6 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 é mostrado e ela ocorre quando os raios dos cilindros externo e interno satisfazem a relação da equação (3.8).

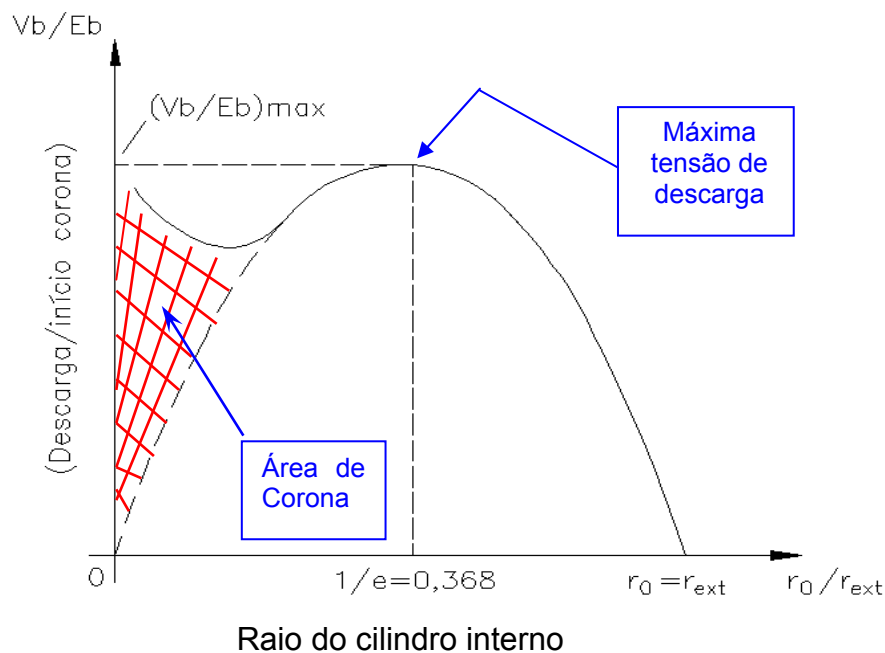


Gráfico 6. Relação entre tensão de ruptura e raio interno em um sistema de cilindro coaxial (Fonte: KUFFEL; ZAENGL, 1984).

A curva com início tracejado é a teórica só que, na prática, ocorre a curva com linha cheia. Para a curva teórica, a relação entre o raio interno e externo é ótimo em $(1/e)$, ou seja, tem-se a máxima tensão para ocorrer uma descarga. Porém, isto não tem nada a ver com descarga corona pois não se garante que a área sob o ponto $(1/e)$ ocorre esta descarga. De acordo com o Gráfico 6, 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 6, 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.

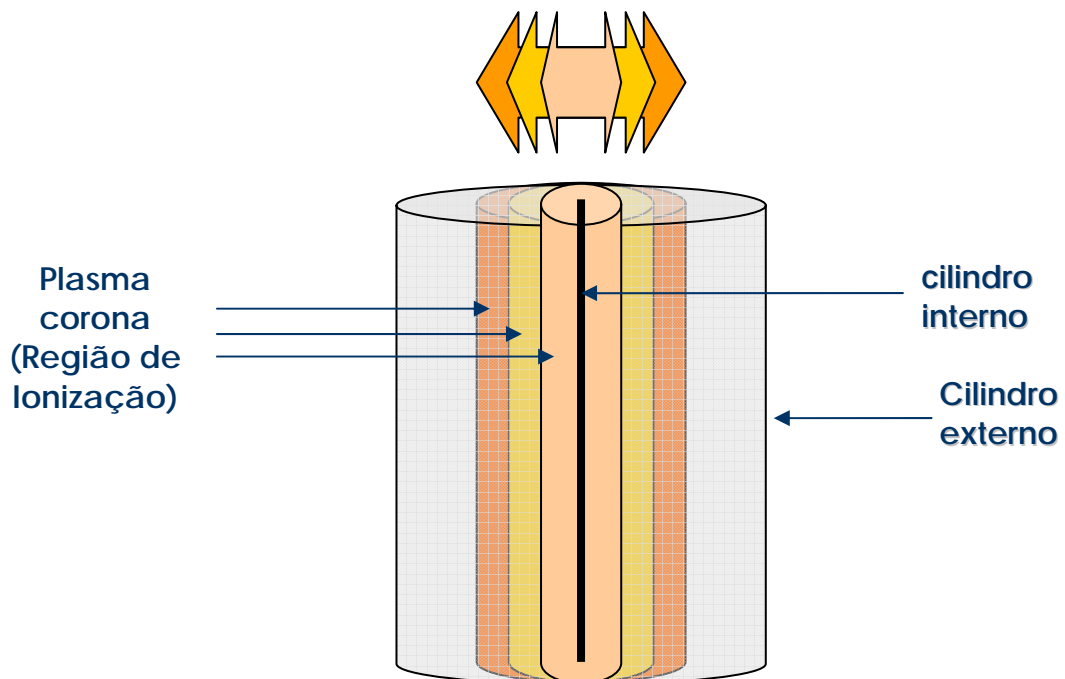


Figura 6. Plasma corona crescendo com o aumento da tensão.

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.

(

4 PROPOSTA DE TRABALHO

O capítulo 4 apresenta a metodologia do trabalho proposto, a descrição da montagem dos dois arranjos experimentais e o procedimento de trabalho. Os resultados preliminares dos primeiros ensaios foram apresentados em forma de tabelas. Uma análise destes números aliada a um gráfico relacionando a produção de ozônio com os valores de equipamentos disponíveis no mercado proporcionou uma melhor comparação entre alguns métodos de geração comercial de ozônio.

4.1 Introdução

De acordo com a USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999), os componentes de um sistema de desinfecção por ozônio compreendem as fases de preparação e tratamento do gás de alimentação, geração de ozônio, desinfecção do efluente e destruição do ozônio, conforme indicado na Figura 7.

A fonte do gás de alimentação pode ser o ar atmosférico ou oxigênio puro. Ambos necessitam de um tratamento preliminar para retirada de umidade. Já o oxigênio exige ou sistema de produção e estocagem no local ou é gerado e usado diretamente.

A fonte de energia para produção de ozônio no reator é provida pelo método das descargas elétricas corona.

Após esta fase, o ozônio entra em contato com o afluente em uma câmara de contato onde será realizado o processo de transferência de massa.

A seguir, o sistema *off-gas* promove a destruição de qualquer ozônio remanescente antes de ser lançado novamente para o meio ambiente. Caso o gás de alimentação seja o oxigênio, este poderá ser reciclado e usado novamente no processo.

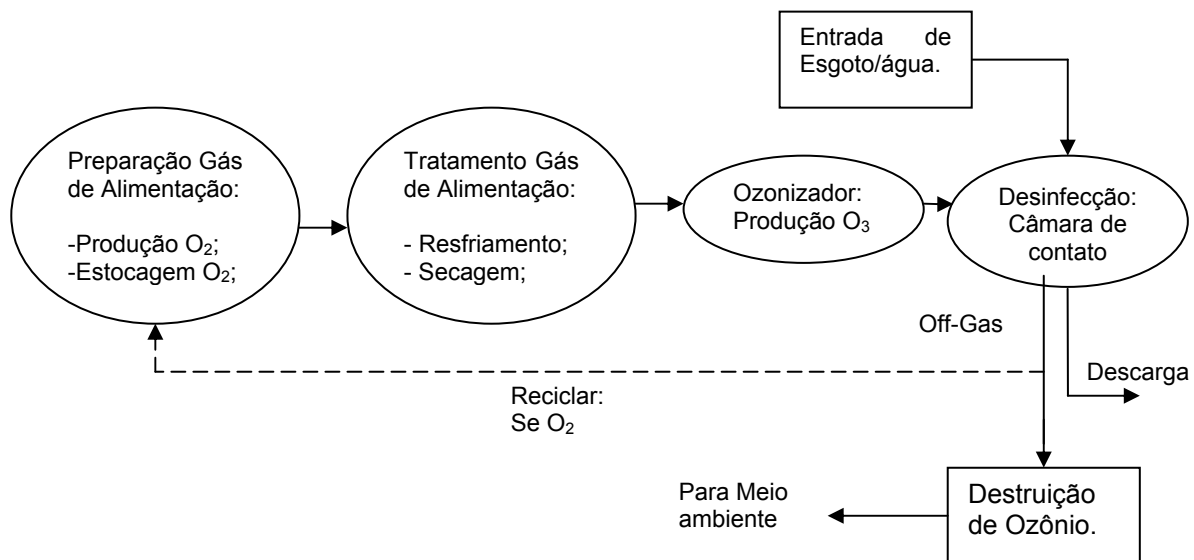


Figura 7. Diagrama esquemático: Processo Ozônio. (Adaptado: USEPA, 1999).

4.2 Metodologia do Trabalho Proposto

A montagem proposta neste trabalho apresenta um sistema de ozonização, diretamente conectado na tubulação do afluente a tratar, reduzindo sobremaneira o trânsito do gás ozônio até a câmara de contato. O conjunto será formado, basicamente, pelos seguintes elementos:

- Um transformador de potencial elevador com corpo epóxi, de alta tensão;

- Um reator de ozônio construído com um tubo metálico de uso comercial e um fio de aço inoxidável, devidamente fixado no seu eixo axial;
- Um injetor tipo Venturi.

O sistema funcionará quando o circuito de alta tensão do reator de ozônio for energizado. Simultaneamente, o injetor Venturi, devidamente acoplado a um tubo *manifold*¹¹ e este ao duto principal, trabalha forçando a entrada do afluente pela sua seção cônica convergente. No momento da passagem deste pela seção reduzida, cria-se uma pressão diferencial negativa (vácuo) dentro do corpo do injetor, provocando o início da sucção do ozônio pela sua entrada lateral. O cálculo da vazão no injetor Venturi é apresentado no Anexo II. A Figura 8 representa esquematicamente o sistema de ozonização proposto.

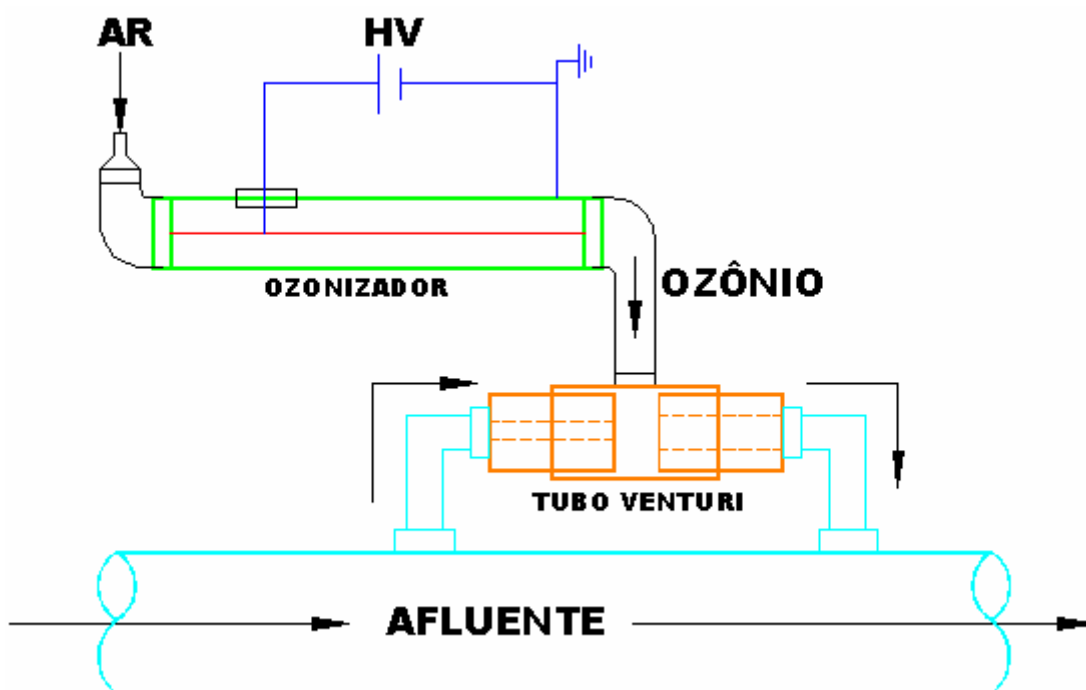


Figura 8. Diagrama esquemático: sistema de ozonização proposto.

¹¹ Câmara ou tubo com diversas aberturas por receber ou distribuir um fluido ou gás.

Com este sistema além da quase direta injeção do ozônio no líquido, também se conseguiu reduzir os custos com o bombeamento, que no caso é praticamente inexistente, e o tratamento do ar que é coletado sem qualquer tratamento prévio, mesmo sabendo que com a remoção de umidade e materiais particulados, pode-se melhorar a eficiência da produção de ozônio. Contudo, para testar todo o sistema em laboratório foi adotada uma outra montagem experimental melhor descrita no item subsequente.

4.3 Montagem Experimental

Para poder medir a eficiência da montagem experimental deste trabalho, duas análises devem ser realizadas:

- 1) A geração ozônio pelo método das descargas corona em alta tensão;
- 2) A medição da produção do ozônio pelo processo de titulação.

Portanto, o diagrama esquemático proposto na Figura 9 foi implementado em parte no Laboratório de Alta Tensão (LAT) do Departamento de Engenharia Elétrica da USP - São Carlos.

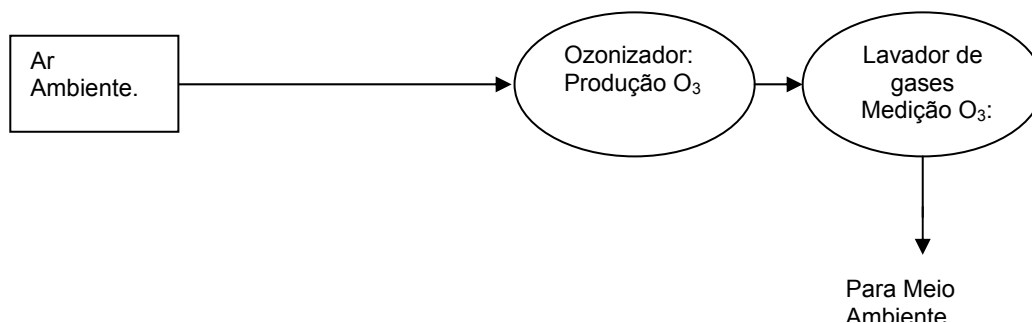


Figura 9. Diagrama esquemático: Montagem executada em laboratório.

Comparando com o sistema apresentado na Figura 6, a fase de bombeamento foi substituída por um compressor de diafragma para facilitar o

procedimento de medição. Nesta etapa, foi implementado o procedimento analítico de titulação iodométrica para medição de ozônio.

Conforme indicado no corte AA na Figura 10, dois arranjos experimentais foram executados, ou seja, no primeiro, o reator de ozônio foi montado com 01 (um) fio metálico e, a seguir, a montagem foi realizada com 03 (três) fios equidistantes.

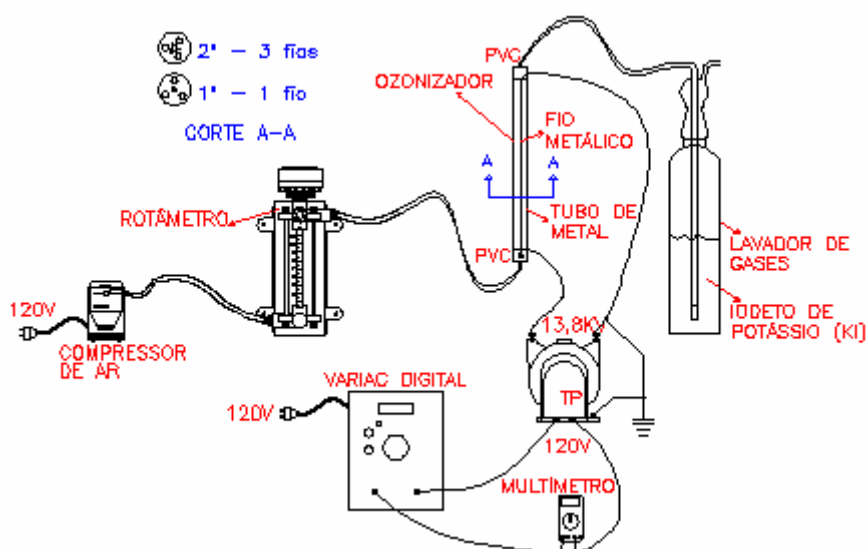


Figura 10. Sistema de ionização com montagem completa para 01 e 03 fios.

4.3.1 Montagem com eletrodo interno de um fio

A Figura 11 mostra o reator de ozônio usado no arranjo experimental com eletrodo interno de um fio, bem como o respectivo diagrama unifilar:

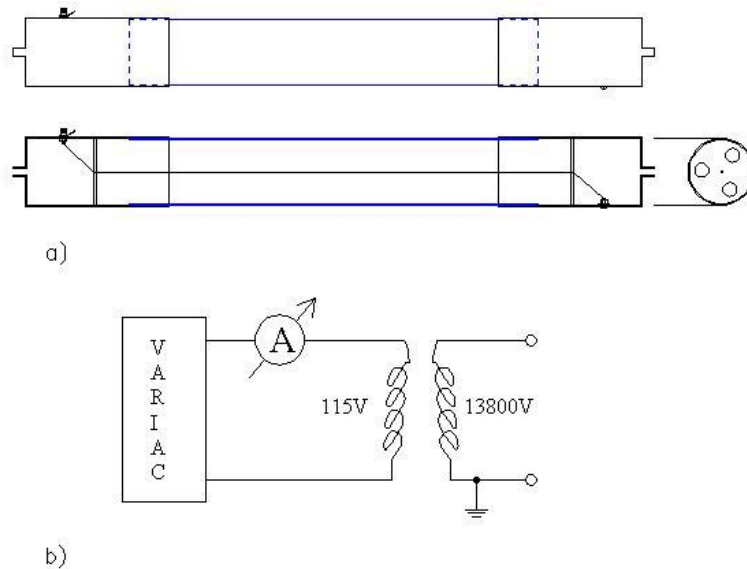


Figura 11. Montagem primeiro protótipo
a)Reator de Ozônio de eletrodo com 1 fio b)Diagrama Unifilar

O reator de ozônio foi montado em um tubo de ferro galvanizado cilíndrico, $\phi_{in}=38\text{mm}$ e comprimento $L=400\text{mm}$. No centro do tubo, foi instalado 01 (um) fio de aço inoxidável de diâmetro 0,5mm sendo conduzido paralelamente a este por meio de dois suportes isolantes feitos em PVC (policloreto de vinila).

Cada extremidade do fio foi devidamente fixada na lateral de um tampão de PVC. Os tampões foram então encaixados no tubo e o fio rigidamente esticado. O conjunto final proporcionou uma montagem tipo cilindros coaxiais isolados.

Para a passagem livre do gás (ar ambiente) foram executados em cada suporte 03 (três) orifícios eqüidistantes.

A lista dos principais equipamentos utilizados nesta montagem são:

- TP - Transformador de potencial monofásico, corpo em epóxi, relação 13,8/0,115KV e potência 400VA, modelo BDE FF-16 da Blindex;
- Compressor de diafragma Nevoni 220Vca; 75W; 12 L/min (livre); cedido pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da USP;

- Rotâmetro Mod.CRV15 – 15kg/24h para gás cloro da marca Guarujá cedido pela SABESP;
- Multímetro digital de bancada, modelo ET-2700 da MINIPA;
- VARIAC – Painel contendo controlador de tensão (0-240VCA) e sistema de proteção contra curto circuito (montado no LAT);

O compressor alimenta o reator, injetando o gás de alimentação por meio de mangueiras de silicone.

O sistema de geração de descargas elétricas, composto principalmente por um TP (Transformador de Potencial), opera na frequência industrial (60Hz) e como transformador elevador. Este TP tem seu secundário (alta tensão), diretamente interligado ao fio e ao reator de ozônio e seu primário na baixa tensão. Um controlador de tensão (VARIAC) completa o circuito, fornecendo tensão alternada variável ao experimento.

Na medição da vazão de gás e da corrente elétrica foram utilizados, respectivamente, um rotâmetro e um multímetro, descritos na lista de equipamentos.

O gás utilizado foi o ar ambiente e umidade relativa e pressão indicadas nas tabelas de 4 a 14. A pressão real é um pouco maior que a atmosférica devido ao sistema de compressão do ar.

Toda a montagem foi interligada ao sistema de aterramento do laboratório.

O ozônio gerado no reator foi injetado no frasco lavador de gases, permanecendo por um tempo pré-determinado em contato com uma solução de Iodeto de Potássio (KI). A Figura 12 mostra a montagem real do sistema de 01 fio:



Figura 12. Montagem real do sistema com eletrodo interno de 01 (um) fio.

4.3.2 Montagem com eletrodo interno de três fios

As Figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, o reator de ozônio usado no arranjo experimental com eletrodo interno de três fios e os respectivos diagramas unifilares para tensões AC, CC Positiva e CC Negativa:

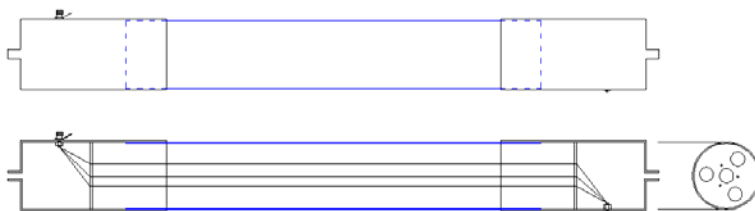


Figura 13. Reator de ozônio com eletrodo interno de três fios.

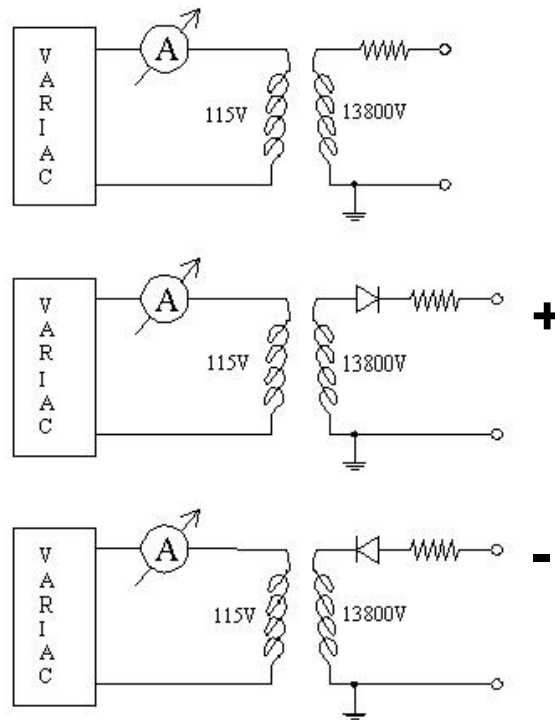


Figura 14. Diagrama unifilar para tensão AC, CC (positivo e negativo).

O sistema de geração de descargas elétricas foi praticamente o mesmo descrito no item anterior, com inclusão de um diodo de alta tensão e uma resistência limitadora, para se obter as tensões contínuas (CC). As polaridades positiva e negativa dessa tensão CC foram obtidas com a inversão dos diodos no circuito como ilustra a figura 14.

O reator de ozônio foi montado em um tubo de cobre nu, $\phi_{in}=64,2\text{mm}$ e comprimento $L=410\text{mm}$. Em seu interior, 03 (três) fios de aço inoxidável de diâmetro 0,5mm foram fixados a dois suportes isolantes feitos em PVC (policloreto de vinila) e a instalados de forma eqüidistantes entre si.

Dois tampões encaixados no tubo completam o conjunto e mantêm os fios em seu interior rigidamente esticados, proporcionando assim uma montagem tipo cilindros coaxiais isolados.

Para a passagem livre do ar ambiente, nas mesmas condições já indicadas, foram executados em cada suporte, 03 (três) orifícios eqüidistantes mais 01 (um) no centro do eixo.

Os demais procedimentos e equipamentos utilizados nesta montagem são os mesmos relacionados no item 4.3.1 anterior, sendo a pressão real um pouco acima da atmosférica devido ao sistema de compressão do ar

Toda a montagem foi interligada ao sistema de aterramento do laboratório. Para proteção contra contatos diretos no sistema de alta tensão, foi prevista uma tela protetora devidamente aterrada.

O ozônio gerado no reator foi injetado no frasco lavador de gases, permanecendo por um tempo pré-determinado em contato com uma solução de Iodeto de Potássio (KI). A Figura 15 mostra a montagem real do sistema a 03 fios:



Figura 15. Montagem real do sistema a 03 (três) fios.

4.3.3 Medição da produção de ozônio

A fase de medição da produção de ozônio é comum às montagens dos itens 4.3.1 e 4.3.2 e foi instalada na capela de exaustão de gases do próprio LAT, conforme Figura 16.



Figura 16. Capela de exaustão de gases

. A vidraria de laboratório utilizada foi a seguinte:

- Dois beckers de 500ml;
- Duas buretas graduadas para análise volumétrica;
- Dois erlenmeyer de 300ml;
- Duas pipetas;
- Uma proveta de 100ml;

- Um suporte universal com garras;
- Frasco lavador de gases cedido pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento - USP;

Todas as soluções utilizadas na análise titulométrica, ou seja, iodo, amido, ácido sulfúrico, tiosulfato de sódio e água destilada, foram preparadas pelo Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica da USP ao longo de toda a pesquisa. Somente a solução de iodeto de potássio a 2% foi preparada no LAT.

Uma pequena amostra do volume da solução ozonizada no lavador de gases foi coletada e titulada, sendo possível medir a produção de ozônio dissolvido na água. Neste trabalho, esta produção foi verificada pelo Método Iodométrico. O anexo I apresenta o procedimento completo para a titulação pelo Método Iodométrico e informações sobre a preparação das soluções. Aqui não foi previsto a medição do ozônio residual pois toda solução de iodeto de potássio reage com o ozônio.

4.4 Procedimento de Trabalho

Após a verificação de todas as conexões elétricas, o compressor foi energizado iniciando a injeção de ar ambiente na tubulação, cuja vazão aplicada e controlada pelo rotâmetro variou entre 3,0 e 11,0 kg/24h.

Como o rotâmetro utilizado era específico para gás cloro, houve a necessidade de correção na leitura e na escala da vazão, conforme valores indicados na tabela 3.

Tabela 3. Rotâmetro: Conversão da leitura da vazão de kg/24h Cl₂ para L/h Ar.

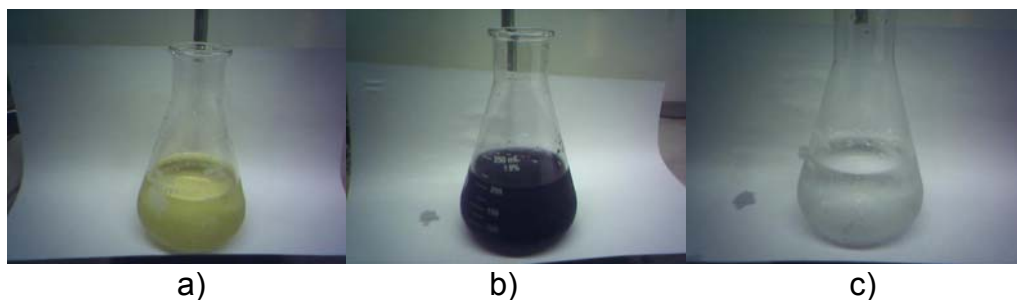
Escala		Vazão de Ar			
kg/24h Cl ₂	3,0	4,0	5,0	8,0	11,0
L/h Ar	66,0	88,0	110,0	176,0	242,0

A tensão aplicada no reator de ozônio foi fornecida pelo VARIAC que, por intermédio de um TP elevador (relação 1:120), impôs-lhe diferentes níveis de tensão, cujos valores variaram entre 7.200 e 13.200 VCA.

Para cada ensaio de produção de ozônio realizado, fixou-se um valor de tensão e vazão de ar, dentro dos limites estabelecidos na Tabela 3. 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 5 minutos.

A solução resultante foi titulada pelo método Iodométrico e os índices obtidos, introduzidos na fórmula de produção de ozônio do respectivo método.

A Figura 17 mostra algumas fases de um exemplo de amostras obtidas em um dos ensaios realizados anteriormente, durante o processo de titulação.

**Figura 17.** Fases do processo de titulação pelo método Iodométrico

A Figura 17 a) apresenta uma amostra com solução de iodeto de potássio (KI) já ozonizada. A Figura 17 b) mostra a fase após a inserção da solução indicadora (amido). A Figura 17 c) exhibe a fase final da titulação onde adicionou-se uma solução de tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) até a amostra tornar-se incolor.

Portanto, para cada ensaio, mediu-se a vazão, a tensão, a corrente aplicada e o teor de corona produzido no reator. Também, antes de cada ensaio, foi medida a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar,

4.5 Apresentação e Análise dos Resultados

Os ensaios iniciais com os dois arranjos experimentais proporcionaram a montagem das Tabelas 4 a 14.

Cada tabela apresenta na coluna da esquerda, de acordo com a data de realização, o número do ensaio, a hora realizada, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar (UR), o volume da solução de iodeto de potássio a ser ozonizado (Vol), a vazão de ar do sistema, a tensão aplicada na Alta Tensão, a corrente lida na Baixa Tensão, o tempo de contato, o volume da amostra a ser titulada (V_{amostra}), o volume gasto na titulação de tiosulfato de sódio ($V_{\text{tios}_{\text{inicial}}}$ e $V_{\text{tios}_{\text{final}}}$), a normalidade do tiosulfato (N), a produção de ozônio por hora ($\text{g O}_3/\text{h}$), a potência consumida (P) e a produção de ozônio por energia consumida ($\text{g O}_3/\text{Wh}$).

4.5.1 Montagem com eletrodo interno de 1 fio

As Tabelas 4 à 7 foram obtidas utilizando o arranjo experimental com eletrodo de um fio e aplicando-se somente tensão alternada. Os resultados dos ensaios são apresentados a seguir.

Tabela 4. Resultados dos ensaios 1 a 4 com os respectivos parâmetros.

DADOS (26/07/05) - Tensão Alternada				
Ensaio nro.	1	2	3	4
Horário	13:15	13:45	14:05	14:40
Temperatura ambiente (°C)	26,6	21,9	21,9	22,3
Umidade Ambiente UR (%)	40	40	40	40
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	66,0	110,0	176,0	242,0
Tensão AT (VAC)	7200	7200	7200	7200
Tensão BT (VAC)	60	60	60	60
Corrente (A)	0,088	0,088	0,088	0,088
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,75	0,75	0,75	0,75
Vol. Tiossulfato final (ml)	0,665	0,84	0,775	0,875
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0014	0,0015	0,0040	0,0020
Potência consumida (W)	5,28	5,28	5,28	5,28
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0003	0,0003	0,0008	0,0004

Tabela 5. Resultados dos ensaios 5 a 8 com os respectivos parâmetros.

DADOS (05/08/05) - Tensão Alternada				
Ensaio nro.	5	6	7	8
Horário	10:15	11:00	13:10	13:50
Temperatura ambiente (°C)	23	23,9	25,5	25,9
Umidade Ambiente UR (%)	40	40	33	32
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	66,0	110,0	176,0	242,0
Tensão AT (VAC)	8400	8400	8400	8400
Tensão BT (VAC)	70	70	70	70
Corrente (A)	0,121	0,120	0,125	0,125
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,75	0,75	0,75	0,75
Vol. Tiossulfato final (ml)	1,635	1,795	2,445	2,275
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0143	0,0169	0,0275	0,0247
Potência consumida (W)	8,47	8,40	8,75	8,75
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0017	0,0020	0,0031	0,0028

Tabela 6. Resultados dos ensaios 9 a 12 com os respectivos parâmetros.

DADOS (26/08/05) - Tensão Alternada				
Ensaio nro.	9	10	11	12
Horário	14:10	15:00	15:40	16:25
Temperatura ambiente (°C)	26,1	26,4	26,6	24,5
Umidade Ambiente UR (%)	38	38	38	44
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	66,0	110,0	176,0	242,0
Tensão AT (VAC)	9000	9000	9000	9000
Tensão BT (VAC)	75	75	75	75
Corrente (A)	0,147	0,149	0,150	0,154
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,508	0,508	0,508	0,508
Vol. Tiossulfato final (ml)	2,11	3,15	3,16	4,625
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,026	0,0428	0,043	0,0667
Potência consumida (W)	11,025	11,175	11,25	11,55
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0024	0,0038	0,0038	0,0058

Tabela 7. Resultados dos ensaios 13 a 16 com os respectivos parâmetros.

DADOS (02/09/05) - Tensão Alternada				
Ensaio nro.	13	14	15	16
Horário	15:15	16:25	16:55	17:20
Temperatura ambiente (°C)	24,8	24,9	24,8	24,6
Umidade Ambiente UR (%)	40	40	40	40
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	66,0	110,0	176,0	242,0
Tensão AT (VAC)	9600	9600	9600	9600
Tensão BT (VAC)	80	80	80	80
Corrente (A)	0,181	0,178	0,186	0,184
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,508	0,508	0,508	0,508
Vol. Tiossulfato final (ml)	3,685	4,25	4,425	4,6
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0515	0,0606	0,0635	0,0663
Potência consumida (W)	14,48	14,24	14,88	14,72
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0036	0,0043	0,0043	0,0045

Comparando-se os valores obtidos para a produção de ozônio (g O₃/Wh) nas tabelas 6 e 7, ensaios nro. 12 e 16, respectivamente, observa-se que o ensaio 16 apresenta um valor menor que o ensaio 12, mesmo com o aumento da tensão aplicada. Isto pode ter ocorrido devido a um desvio na leitura dos dados, na falta de sistematização do processo ou o resultado está dentro das incertezas de medição.

4.5.2 Montagem com eletrodo interno de 3 fios

As tabelas 8 a 10 foram obtidas utilizando o arranjo experimental com eletrodo de três fios e aplicando-se tensão CC polaridade negativa.

Os ensaios realizados em 28 de março de 2006 aplicando-se 7.200, 8.400 e 9.600VCA com vazão de 88,0 L/h de ar ambiente foram descartados, pois os resultados não apresentaram produção de ozônio suficiente para as medições. O ensaio no.1 da tabela 8, realizado no dia mesmo dia, também não apresentou produção suficiente mas foi apresentado.

Os resultados das tabelas 8 a 10 são apresentados a seguir:

Tabela 8. Resultados dos ensaios 1 a 4 com os respectivos parâmetros.

DADOS (28/03/06 a 30/03/06) – Tensão CC - Polaridade Negativa				
Ensaio nro.	1	2	3	4
Horário	10:45	9:20	9:50	10:25
Temperatura ambiente (°C)	26,8	24,9	25,1	25,3
Umidade Ambiente UR (%)	51	63	63	63
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	88,0	88,0	88,0	88,0
Tensão AT (VAC)	9600	10800	12000	13200
Tensão BT (VAC)	80	90	100	110
Corrente (A)	0,110	0,140	0,180	0,243
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiossulfato final (ml)	0,68	0,85	1,63	2,18
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	(*)	0,0006	0,0133	0,0222
Potência consumida (W)	8,80	12,60	18,00	26,73
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	(*)	4,76x10 ⁻⁵	0,0007	0,0008

Tabela 9. Resultados dos ensaios 5 a 8 com os respectivos parâmetros.

DADOS (11/04/06) – Tensão CC - Polaridade Negativa				
Ensaio nro.	5	6	7	8
Horário	13:15	13:50	14:20	14:50
Temperatura ambiente (°C)	27,4	27,5	27,6	27,8
Umidade Ambiente UR (%)	48	48	48	48
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	176,0	176,0	176,0	176,0
Tensão AT (VAC)	9600	10800	12000	13200
Tensão BT (VAC)	80	90	100	110
Corrente (A)	0,112	0,138	0,178	0,240
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiossulfato final (ml)	0,895	1,50	2,365	2,97
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0014	0,0112	0,0252	0,0350
Potência consumida (W)	8,96	12,42	17,80	26,40
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0002	0,0009	0,0014	0,0013

Tabela 10. Resultados dos ensaios 9 a 12 com os respectivos parâmetros.

DADOS (25/04/06 a 04/05/06) – Tensão CC - Polaridade Negativa				
Ensaio nro.	9	10	11	12
Horário	10:30	10:30	11:00	9:00
Temperatura ambiente (°C)	25,6	25,9	26,4	20,6
Umidade Ambiente UR (%)	52	45	44	30
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45	0,50
Vazão de ar (l/h)	242,0	242,0	242,0	242,0
Tensão AT (VAC)	9600	10800	12000	13200
Tensão BT (VAC)	80	90	100	110
Corrente (A)	0,111	0,137	0,172	0,237
Tempo contato (min)	5	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200	200
Vol. Tiosulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiosulfato final (ml)	1,03	1,57	2,40	3,13
Normalidade tiosulfato	0,025	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0036	0,0123	0,0258	0,0418
Potência consumida (W)	8,88	12,33	17,20	26,07
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0004	0,0010	0,0015	0,0016

As tabelas 11 e 12 foram obtidas utilizando o arranjo experimental com eletrodo de três fios e aplicando-se tensão CC polaridade positiva.

Os ensaios realizados no dia 05 de outubro de 2006 aplicando-se 8.400, 10.800 e 13.200VCA com vazão de 110,0 e 242,0 l/h de ar ambiente, não apresentaram produção de ozônio suficiente para as medições, porém, seus dados foram apresentados nas tabelas 11 e 12 conforme a seguir:

Tabela 11. Resultados dos ensaios 1 a 3 com os respectivos parâmetros.

DADOS (05/10/06) – Tensão CC - Polaridade Positiva			
Ensaio nro.	1	2	3
Horário	9:45	10:10	10:30
Temperatura ambiente (°C)	24	24,5	24,9
Umidade Ambiente UR (%)	66	64	64
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	110,0	110,0	110,0
Tensão AT (VAC)	8400	10800	13200
Tensão BT (VAC)	70	90	110
Corrente (A)	0,091	0,137	0,237
Tempo contato (min)	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiossulfato final (ml)	0,195	0,21	0,445
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	(*)	(*)	(*)
Potência consumida (W)	6,37	12,33	26,07
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	(*)	(*)	(*)

(*) – Não apresentou produção de ozônio suficiente para medição.

Tabela 12. Resultados dos ensaios 4 e 5 com os respectivos parâmetros.

DADOS (05/10/06) – Tensão CC - Polaridade Positiva		
Ensaio nro.	4	5
Horário	13:45	13:00
Temperatura ambiente (°C)	26,9	26,8
Umidade Ambiente UR (%)	55	56
Volume solução (l)	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	242,0	242,0
Tensão AT (VAC)	8400	13200
Tensão BT (VAC)	70	110
Corrente (A)	0,088	0,235
Tempo contato (min)	5	5
Volume amostra (ml)	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,81	0,81
Vol. Tiossulfato final (ml)	0,13	0,45
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	(*)	(*)
Potência consumida (W)	6,16	25,85
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	(*)	(*)

(*) – Não apresentou produção de ozônio suficiente para medição.

As tabelas 13 e 14 foram obtidas utilizando o arranjo experimental com eletrodo de três fios e aplicando-se tensão AC (alternada).

O ensaio realizado em 19 de outubro de 2006 aplicando-se 7.200 VCA e vazão de 242,0 l/h de ar ambiente foi descartado, pois os resultados não apresentaram produção de ozônio suficiente para as medições. O ensaio no.4 da tabela 14, realizado no dia 05 de outubro de 2006, também não apresentou produção suficiente, mas foi apresentado.

Os resultados das tabelas 13 e 14 são apresentados a seguir:

Tabela 13. Resultados dos ensaios 1 a 3 com os respectivos parâmetros.

DADOS (19/10/06 e 26/10/06) – Tensão Alternada			
Ensaio nro.	1	2	3
Horário	13:40	9:30	10:10
Temperatura ambiente (°C)	26,3	25,6	25,9
Umidade Ambiente UR (%)	61	57	55
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	110,0	110,0	110,0
Tensão AT (VAC)	8400	10800	13200
Tensão BT (VAC)	70	90	110
Corrente (A)	0,092	0,145	0,242
Tempo contato (min)	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200
Vol. Tiosulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiosulfato final (ml)	1,00	1,54	2,96
Normalidade tiosulfato	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0030	0,0118	0,0348
Potência consumida (W)	6,44	13,05	26,62
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0005	0,0009	0,0013

Tabela 14. Resultados dos ensaios 4 a 6 com os respectivos parâmetros.

DADOS (05/10/06) – Tensão Alternada			
Ensaio nro.	4	5	6
Horário	9:30	10:00	10:30
Temperatura ambiente (°C)	24,6	24,9	25,1
Umidade Ambiente UR (%)	65	66	65
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	242,0	242,0	242,0
Tensão AT (VAC)	8400	10800	13200
Tensão BT (VAC)	70	90	110
Corrente (A)	0,095	0,145	0,240
Tempo contato (min)	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200
Vol. Tiosulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiosulfato final (ml)	0,54	1,785	3,66
Normalidade tiosulfato	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	(*)	0,0158	0,0462
Potência consumida (W)	6,65	13,05	26,4
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	(*)	0,0012	0,0017

(*) – Não apresentou produção de ozônio suficiente para medição.

A tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios realizados no dia 11 de outubro de 2006 utilizando o arranjo experimental com eletrodo de três fios e aplicando-se tensões AC (alternada) e CC (polaridade negativa e positiva). O ensaio realizado com tensão CC polaridade positiva, não apresentou produção suficiente para as medições, mas foi apresentado.

Tabela 15. Comparação dos resultados: Tensões AC, CC (-) e CC (+).

DADOS (11/10/06)			
Polaridade da Tensão	AC	CC (-)	CC (+)
Horário	11:30	10:45	10:15
Temperatura ambiente (°C)	26,2	25,9	25,1
Umidade Ambiente UR (%)	46	48	50
Volume solução (l)	0,45	0,45	0,45
Vazão de ar (l/h)	242,0	242,0	242,0
Tensão AT (VAC)	13200	13200	13200
Tensão BT (VAC)	110	110	110
Corrente (A)	0,240	0,237	0,227
Tempo contato (min)	5	5	5
Volume amostra (ml)	200	200	200
Vol. Tiossulfato inicial (ml)	0,81	0,81	0,81
Vol. Tiossulfato final (ml)	2,70	2,90	0,40
Normalidade tiossulfato	0,025	0,025	0,025
Produção Ozônio (g O ₃ /h)	0,0306	0,0340	(*)
Potência consumida (W)	26,4	26,07	24,97
Produção Ozônio (g O ₃ /Wh)	0,0012	0,0013	(*)

(*) – Não apresentou produção de ozônio suficiente para medição;

Os valores apresentados na tabela 15 para Tensão AT (VAC), polaridade negativa e positiva, são teóricos. Para se obter o valor real, que será menor devido a queda de tensão no diodo, deve-se medir o valor eficaz da tensão. Para os valores apresentados acima, a produção de ozônio foi equivalente para tensão alternada e tensão contínua com polaridade negativa. Desta forma, não haveria necessidade de se colocar diodo.

Para possibilitar uma comparação entre os resultados dos dois arranjos experimentais (eletrodo interno de um e três fios) ensaiados em laboratório com ozonizadores de mercado, foi gerada a Tabela 16.

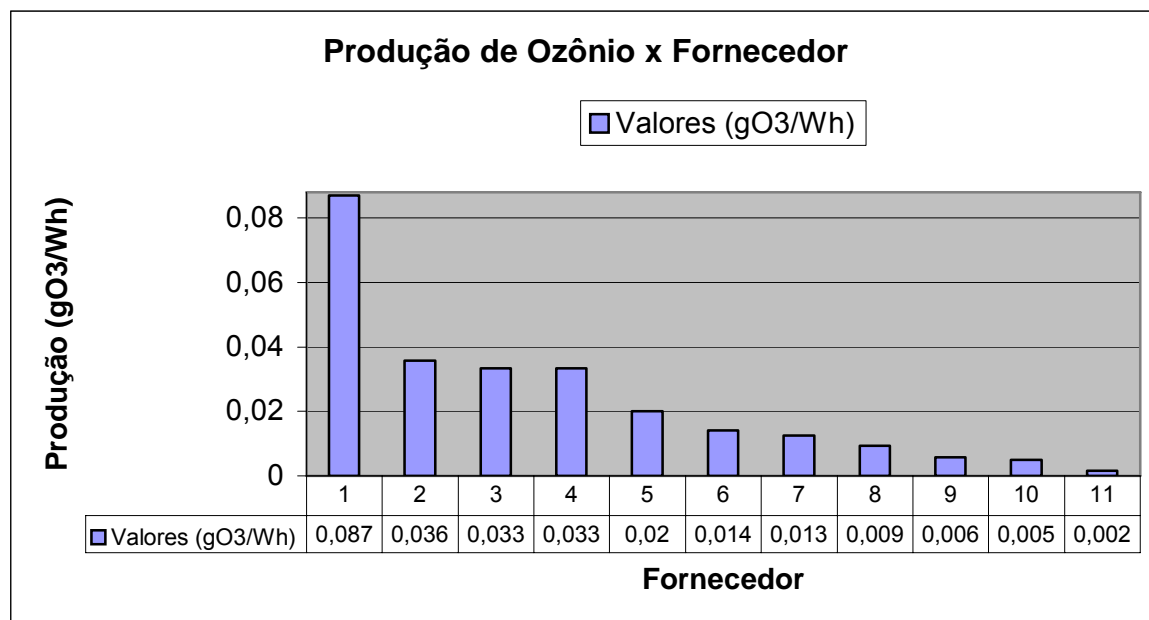
Tabela 16. Ozonizadores: Dados dos modelos comerciais e os da pesquisa.

Ordem Fornecedor	Fabricantes	Modelo	Tensão de Entrada (VCA)	Potência (W)	Corrente (A)	Gás	Vazão Gás (l/h)	Tempo de contato (h)	Produção de Ozônio (gO ₃ /h)	Consumo de energia (Wh)	Produção de Ozônio (gO ₃ /Wh)	Consumo/Ozônio gerado (Wh/gO ₃)
1	Lenntech (Holanda)	OT-020	230	230*	1,000	O ₂	132	1	20	230*	0,0870*	115*
2	A to Z Ozone (USA)	OZ-5G	120	140	0,167*	Ar	187	1	5	140	0,0357	28
3	Prominent (Alemanha/Brasil)	OZVa 1	230	150	0,652*	Ar	400	1	5	150	0,0333	30
4	Ozomax (Canadá)	OZO 2 VTT	120	120	1,000*	Ar	566	1	4	120	0,0333	30
5	Wedeco (Alemanha)	MODULAR 2	120	100	0,833*	Ar	1000	1	2	100	0,0200	50
6	H2O Engineering (USA)	OSU10-26	120	1840	15,33*	Ar	6456	1	26	1840	0,0141	70
7	Ozontechnik (USA/Brasil)	CENTURION 2	127	160	1,260*	O ₂	1000	1	2	160	0,0125	80
8	Eaglesat (Brasil)	PXZ3507	127	750	5,910*	O ₂	300	1	7	750	0,0093	108
9	USP (Brasil)	PROTÓTIPO 1	75	11,55	0,154	Ar	242	5/60	0,067	0,963	0,0058	172
10	DELZONE (USA)	CD-2	115	575*	3,5	O ₂	85	1	2	403*	0,0050	202*
11	USP (Brasil)	PROTÓTIPO 2	110	26,07	0,237	Ar	242	5/60	0,042	2,173	0,0016	620

Obs.: (*) – valores estimados

O Gráfico 7 apresenta uma melhor visualização dos valores de Produção de Ozônio para cada fornecedor.

Gráfico 7. Produção Ozônio x Fornecedor.



4.5.3 Análise dos resultados

A primeira consideração a ser feita é com relação à configuração dos protótipos montados no laboratório. Este trabalho se baseou na configuração de cilindros coaxiais para a geração de descargas corona, conforme a maioria dos ozonizadores de mercado. O tratamento apresentado no capítulo 3 forneceu recursos para o projeto deste sistema, considerando a máxima produção de descargas corona.

Entretanto, com a intenção de redução de custos, procurou-se fabricar protótipos de fácil exeqüibilidade, utilizando tubos de material e dimensões

facilmente encontrados no mercado nacional, a exemplo do primeiro protótipo, com eletrodo interno de um fio, que foi montado utilizando um tubo de ferro galvanizado de diâmetro interno 38 mm e do segundo protótipo (eletrodo interno de 3 fios), onde se empregou um tubo de cobre de diâmetro interno 64,2 mm.

Neste último protótipo os três fios internos foram dispostos de forma equidistantes entre si e o tubo externo. Com esta geometria procurou-se reproduzir a mesma configuração de um tubo interno de diâmetro maior e o conseqüente espalhamento das descargas por uma área mais ampla, proporcionando assim, a geração de descargas corona com a mesma intensidade desta, contudo, com níveis de tensões menores. Aqui, o Campo Elétrico distorcido não poderá ser calculado pela equação (3.6) uma vez que o fenômeno físico envolvido nesta montagem é mais complexo. Assim, uma modelagem matemática deste problema se faz necessária e deverá ser solucionada de forma numérica, a exemplo da solução pelo Método dos Elementos Finitos ou pelo Método das Diferenças Finitas.

Assim, foi possível empregar um protótipo com configuração semelhante a de um ozonizador de mercado, ou seja, gerando descargas corona utilizando tubos internos de diâmetros maiores, porém, aplicando tensões menores.

Outra consideração diz respeito ao material dos protótipos onde foram alterados o material dos eletrodos do tubo externo, sendo que no primeiro protótipo se empregou ferro galvanizado e, no segundo protótipo, o cobre, para aprimorar a eficiência da produção do ozônio, como indicado nos estudos de Panaget et al. (1996). O material do eletrodo interno das duas versões foi o aço inoxidável devido a sua boa resistência à tração e corrosão. Nas tabelas 4 a 14, são apresentados os resultados preliminares desses protótipos e uma análise de seu desempenho é feita nos parágrafos subseqüentes.

As tabelas 4 a 7, para o protótipo de 1 fio sob tensão alternada, mostram que, com o aumento da vazão e da tensão aplicada, a produção de ozônio também aumenta. Nesta montagem, devido a não utilização de um resistor limitador de corrente no circuito da alta tensão, os testes foram limitados a 9.600VCA sendo que a montagem permitia níveis até 13.200VCA.

As tabelas 8 a 10 e 13 e 14 para o protótipo de 3 fios sob tensão CC negativa e alternada, respectivamente, mostram que o aumento da vazão e da tensão aplicada, resultam também numa produção maior de ozônio. Além disso, verifica-se que esta produção foi semelhante para os dois tipos de tensão aplicada.

O protótipo de 3 fios sob tensão CC positiva, não apresentou produção de ozônio suficiente para medição, conforme indicado pelos resultados apresentados nas tabelas 11 e 12.

A tabela 15 compara os resultados de produção de ozônio no protótipo de 3 fios sob a influência das tensões AC, CC negativa e CC positiva. Para os níveis aplicados, verifica-se que a produção sob tensão CC negativa é ligeiramente maior que sob tensão AC e praticamente não forneceu medição sob tensão CC polaridade positiva, conforme exposto na teoria.

Comparando os resultados das tabelas 4 a 7 (1 fio – tensão AC) com 8 e 10 (3 fios – tensão CC negativa) e 13 e 14 (3 fios – tensão AC), verifica-se que a produção de ozônio para o segundo protótipo foi bem inferior ao primeiro, mesmo utilizando o cobre como material condutor e sob tensão CC negativa. Além disso, no primeiro protótipo foram obtidos estes resultados aplicando somente 9.600VCA sob tensão AC contra 13.200VCA, retificado para a tensão CC negativa do segundo protótipo.

Outra análise relevante é comparar os resultados apresentados pelos protótipos da pesquisa com ozonizadores de mercado. Para tanto, a tabela 16 relaciona alguns ozonizadores dos principais fabricantes presentes no mercado nacional e internacional, exibindo seus dados técnicos de operação e produção de ozônio em confronto com os dados obtidos nos ensaios dos protótipos 1 e 2. Foram selecionados equipamentos de pequeno porte cujo gás de alimentação é o ar ambiente. Porém, como alguns fabricantes só trabalham com oxigênio concentrado (95% de oxigênio puro), para efeito de comparação, alguns destes equipamentos também foram incluídos na tabela.

Cabe aqui salientar que a coleta da maioria dos dados destes ozonizadores comerciais foi feita utilizando as informações técnicas contidas em catálogos disponíveis nas páginas da *Internet* destes fabricantes. Além disso, houve grande dificuldade na obtenção de outras informações, diretamente com os fabricantes, já que os mesmos tratam o assunto como sigilo industrial.

A principal análise a ser feita na tabela 16, e melhor visualizada no gráfico 7, refere-se à coluna de produção de ozônio por energia consumida (gO_3/Wh) de cada fornecedor. Para tanto, os fabricantes foram classificados em ordem decrescente de produção. Pode-se verificar que a maioria dos ozonizadores de mercado apresenta produção superior aos protótipos da pesquisa. Porém, a produção do protótipo 1 poderia ser melhorada se, ao invés de 75VCA, fosse aplicada uma tensão de 110VCA. Conseqüentemente, o consumo de energia por ozônio gerado também seria reduzido. Além disso, comparando os dados de potência consumida e produção, nota-se que o PROTÓTIPO 1 teve um consumo muito menor que os do mercado, o que lhe confere a possibilidade de aumentar sua produção utilizando outras unidades em paralelo e em série. Apesar de toda essa possibilidade de

melhoria, o PROTÓTIPO 1 ainda conseguiu melhor rendimento que um modelo de mercado (fabricante no.10) que tinha como gás de alimentação oxigênio concentrado.

Finalmente, observar que os ensaios foram realizados nas condições ambientais, geralmente não adequadas para a geração ótima de ozônio, pois deve-se levar em conta:

- a umidade;
- a temperatura;
- a pressão;
- as impurezas do ar.

5 CONCLUSÕES

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho bem como propostas para trabalhos futuros.

A análise realizada sobre a tabela 16 possibilitou a comparação da produção de ozônio dos modelos industriais com os protótipos desta pesquisa. Antes, porém, um fato importante deve ser mencionado aqui e que diz respeito ao levantamento de dados dos equipamentos de mercado. Houve grande dificuldade em se obter informações técnicas completas, tanto nos catálogos eletrônicos disponíveis na *internet*, bem como diretamente com os fabricantes, sendo necessário o estabelecimento de algumas condições, tais como o cálculo da potência consumida ou a corrente de alimentação do conjunto. Para tanto, para garantir a validação das informações apresentadas pelos fabricantes, seria desejável a aquisição de vários destes equipamentos para realização de ensaios de produção, seguindo o mesmo procedimento adotado nesta pesquisa.

Então, a tabela mostra que, apesar do protótipo 1 apresentar uma melhor produção de ozônio por consumo de energia que um determinado modelo de mercado, esta primeira fase não produziu os resultados esperados, carecendo ainda

de estudos mais aprimorados. Alguns fatores, entretanto, podem ter contribuído para o baixo rendimento dos protótipos nesta fase:

- o emprego de reatores de ozônio cujas dimensões foram escolhidas de forma qualitativa;
- não foi previsto no circuito elétrico de Alta Tensão da montagem do protótipo 1, a instalação de um resistor limitador de corrente, o que limitou o valor da tensão aplicada a 9.200VCA, restringindo a geração de descargas corona.
- a utilização nos testes de produção de ozônio, de uma coluna de contato com dimensões reduzidas, não garantindo que todo o ozônio gerado estava sendo absorvido pela solução do Iodeto de Potássio;
- a limitação do método utilizado na verificação da produção de ozônio que, apesar de ser eficiente, apresenta erros inerentes a análise química;
- a exigência de maior familiaridade na manipulação e conservação dos reagentes químicos utilizados na análise titulométrica, pois o emprego incorreto pode acarretar na degradação de suas características.

Sistemas auxiliares de acondicionamento do gás de alimentação (bombeamento, resfriamento e secagem) utilizados normalmente nos equipamentos industriais, intencionalmente deixaram de ser empregados neste trabalho pelos motivos melhor explicados a seguir:

- sistema de bombeamento: como a proposta deste trabalho é a instalação do sistema diretamente no campo, de forma co-corrente à tubulação do sistema de esgoto ou tratamento de água, a injeção de ozônio ocorrerá por pressão negativa, quando da passagem do fluido pelo tubo Venturi;

- sistema de resfriamento: como não serão empregados compressores para bombeamento, o gás de alimentação não sofrerá aquecimento joule sendo seu uso desnecessário, evitando assim o desperdício de água;
- sistema de secagem: o não controle da umidade do gás de alimentação pode reduzir a produção de ozônio. Porém como um dos objetivos é a construção de um sistema simples, não foi previsto inicialmente nenhum sistema de controle de umidade, mesmo estando sujeito a possível corrosão dos componentes;

Apesar de os protótipos terem apresentado produção de ozônio menor que as do mercado, estes encerram em si características de dimensão e peso reduzidas. Assim, cada protótipo é considerado uma unidade celular do conjunto ozonizador, ou seja, podem-se agregar outras células em série ou paralelo, conferindo maior eficiência na produção de ozônio. Desta forma, a multiplicação do sistema é possível principalmente para atender a demanda de desinfecção requerida pela estação de tratamento.

Outras características que contribuem para esta flexibilização são os baixos custos de fabricação e implantação das células, que utilizam materiais com tecnologia nacional, além de possuírem fácil manutenção. Cada célula testada em laboratório, incluindo todos os materiais, equipamentos auxiliares (TP, cabos, etc.) e mão de obra, apresentou um custo unitário de montagem inferior a US\$ 150,00 (cento e cinquenta dólares). Neste estudo, como os ensaios foram realizados apenas em laboratório, não foram previstos custos de implantação completa em campo, incluindo equipamentos auxiliares, quantidade de células necessárias para uma demanda requerida de tratamento, consumo de energia e manutenção do sistema. Este estudo deverá ser realizado numa fase seguinte a este trabalho.

Porém, analisando os custos operacionais requeridos por sistemas de ozonização industrial, como indicado nos estudos de Bassani (2003) e Assirati (2005) fica evidente que o elevado investimento requerido por estes sistemas, contribui para a continuidade desta pesquisa.

Finalmente, verifica-se que essa tecnologia ainda carece de maior domínio e conhecimento para aplicações em estações de tratamento de água e esgotos domésticos, principalmente devido às diversas condições do meio fluído (temperatura, turbidez, pH, etc..), mas as suas vantagens relacionadas à desinfecção de microorganismos patógenos (elementos que podem provocar doenças) e oxidação da matéria orgânica, resultando em benefícios para os seres humanos e o meio ambiente, justifica-se o investimento em pesquisas mais aprofundadas nesta área, objetivando principalmente a redução de custos.

5.1 Continuidade da Pesquisa

Os resultados apresentados nos primeiros ensaios indicam que a eficiência na produção de ozônio pode ser melhorada. Assim, para trabalhos futuros que darão continuidade a esta pesquisa, algumas sugestões são propostas conforme a seguir.

- Como as dimensões dos protótipos 1 e 2 foram escolhidas de forma qualitativa, um projeto mais eficiente deve prever a construção de ozonizadores considerando valores ótimos para as medidas dos raios interno e externo, tensão inicial de geração ou intervalos para se

trabalhar na região de ionização e o comprimento do tubo (função da vazão do gás).

- O procedimento adotado para retirar a umidade do ar a ser injetado em ozonizadores comerciais consiste em utilizar um resfriador para baixar o ponto de orvalho (retira umidade) do ar para próximo de -60°C . Para tanto é necessário utilizar um desumidificador e um filtro para retirar partículas de poeira. Como alternativa, será proposta a utilização de sílica gel dessecante, protegida por um filtro tipo tela para partículas maiores, conforme apresentado na figura 18.

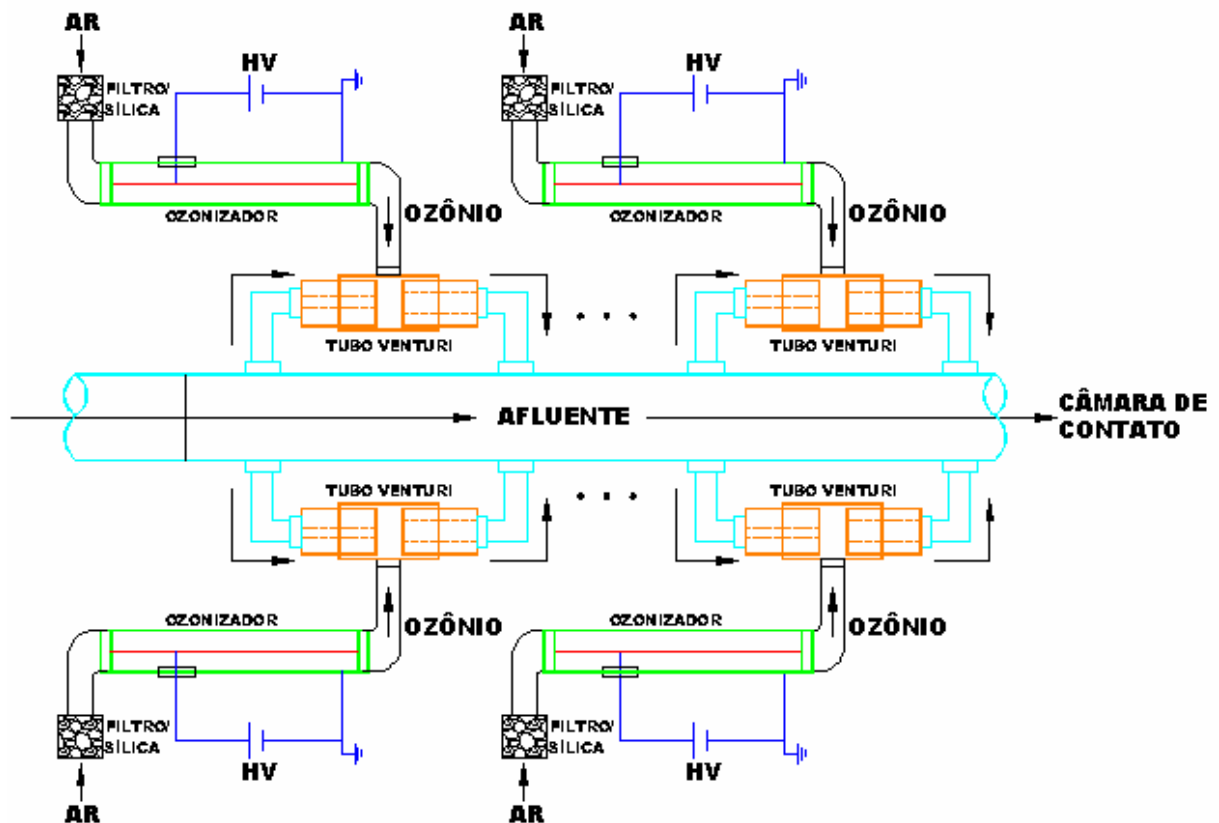


Figura 18. Diagrama esquemático: montagem futura de sistema de ozonização.

- Ainda pela figura 18, para aumentar a produção e permitir a flexibilização do atendimento à demanda de ozônio, o sistema prevê a fácil instalação

- e conseqüente ampliação das unidades celulares compostas por sílica gel, reator de ozônio, transformador de alta tensão e tubo Venturi;
- Deve-se estudar a utilização de materiais mais resistentes à corrosão além de favorecer a geração de descargas corona;
 - O processo corona pode degradar o ozônio, ou seja, na presença de ar atmosférico, as descargas combinam-se com o nitrogênio formando o dióxido de nitrogênio (NO_2) que, na presença de água, produz o ácido nítrico (HNO_3). Este, por sua vez, diminui a produção de ozônio além de corroer o equipamento. Portanto, deve-se aprimorar o protótipo utilizando tubos menores em série ou paralelo, onde pela vazão aumentada, não haverá tempo da descarga corona degradar o ozônio. Assim, a definição do comprimento ideal do tubo é função da vazão do gás e será definida pelo cálculo do tubo Venturi.
 - Conforme apresentado em Chernicharo et al.(2001, apud LAPLANCHE, 2000)¹², deve se prever a construção de um tanque de contato logo após a injeção de ozônio, para proporcionar uma melhor transferência deste gás para a fase líquida e garantir um tempo de contato suficiente para promover a desinfecção.

¹² LAPLANCHE, A., *Lé traitement à l'Ózone. Apostila Curso ENSCR, Rennes, França, 2000.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SALAM M. et al. **High-voltage engineering: theory and practice**. 2. ed. New York, Marcel Dekker. 2000.

ALONSO, J.M. et al. **Low-power high-voltage high-frequency power supply for ozone generation**. IEEE Transactions on Industry Applications, v.40, n.2, p.414-421, 2004.

ALONSO, J.M. et al. **Low-power high-voltage universal-input inverter for ozone generation**. CIEP. Guadalajara, October 20-24, México, p.153-159, 2002.
Artigo com informações de ozônio e ozonizadores. Disponível no site: <http://www.lateralscience.co.uk/marum/index.html>. Acessado em 15/01/2007.

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. **Modern theory of corona discharge**. In: 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Tokyo, July 8-12, Japan, 1991.

CHALMERS, I.D. et al. **Ozone generation by pulsed corona discharge in a wire cylinder arrangement.** IEE, 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.

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.

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 PROSAB; FINEP, 2003.

GRABOWSKI, L.R. **Pulsed corona in air for water**, Doctor thesis, Eindhoven, 2006. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006.

JENEI, I.; KISS, E. **Development of the ozone generation by the variation of auxiliary electrodes**. Journal of Electrostatics 63 – Elsevier p.985-991, 2005.

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.

KUEFFEL E.; ZAENGL W.S. **High-voltage engineering: fundamentals**. 1. ed. Pergamon Press. 1984.

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 Sci. Technol. P.82-91, 2001

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.

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.

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.

RICE, R.G. **Applications of ozone for industrial wastewater treatment – a review.** Ozone Science & Engineering, v.18, p.477-515, 1996.

ROSSETTI, A.R. **Dicionário iterativo de química.** Disponível em: <<http://www.Rossetti.eti.br/dicuser/index2.asp>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2007.

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.

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.** Disponível em: <<http://www2.ufpi.br/quimica/rosa/Intro.doc>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2007.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for examination of water and wastewater** 19^a ed. Washington D.C., American Publications Health Association. 1995.

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.

ANEXO

ANEXO I : Titulação pelo método Iodométrico

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 um 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 abaixo.

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 seqüência, 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 (tiosulfato de sódio 0,025N, amido, iodo 0,1N e ácido sulfúrico 1N), foram todos fornecidos pelo Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica da USP com exceção da solução de iodeto de potássio em água destilada feita no próprio LAT conforme a seguir:

Solução de Iodeto de Potássio (KI) a 2%:

100 g KI → 5 L H₂O destilada

Dissolver o KI na água destilada, colocar em recipiente escuro, tampar e armazenar na geladeira por no mínimo, 24 horas antes da sua utilização.

Ensaio de referência

- Preparação do branco (solução de referência) (em triplicata):

1. 200 ml de KI;
2. 10 ml de H₂SO₄;
3. 2 ml de amido;
4. Titular com o iodo até atingir a coloração azul escura e anotar o volume utilizado (V_i);
5. Titular com tiosulfato de sódio até a solução voltar a ficar incolor e anotar o volume (V_t);

O volume do branco será:

$$V_b = V_i - V_{\text{tios.}}$$

Ensaio de produção

1. Adiciona-se ao tubo de contato, o volume de KI (V_{KI}), anotando o valor adotado, o mesmo para o frasco lavador;
2. Ozoniza-se durante tempo de contato de 5 minutos (t), anotando o valor adotado;

3. Após finalizar o tempo de contato, coletar amostra (V_{am}) do frasco lavador de gás e fixa-se com solução de ácido sulfúrico 1N segundo a seguinte relação:

100 ml de amostra \rightarrow 2 ml de H_2SO_4

4. Titula-se a amostra com tiosulfato de sódio até que adquira uma coloração amarela-palha;

5. Adiciona-se 2 ml de solução indicadora de amido, para cada 200 ml de amostra, o que torna a amostra azulada;

6. Continua-se a titulação com tiosulfato de sódio até que a cor azul desapareça totalmente, anotar volume total de tiosulfato de sódio gasto (V_F);

7. Cálculo da Produção de Ozônio:

$$P(\text{g/h}) = \frac{N \times (V_F - V_b) \times V_{KI} \times 1440}{V_{am} \times t}$$

onde:

P (g/h) - produção de ozônio;

N - normalidade do tiosulfato;

($V_f - V_b$)- diferença entre o volume final e o inicial do tiosulfato de sódio (ml).

V_{KI} - volume da solução (ml);

V_{AM} - volume da amostra (ml);

t - tempo de contato (min.).

ANEXO II: Medidor 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 19:

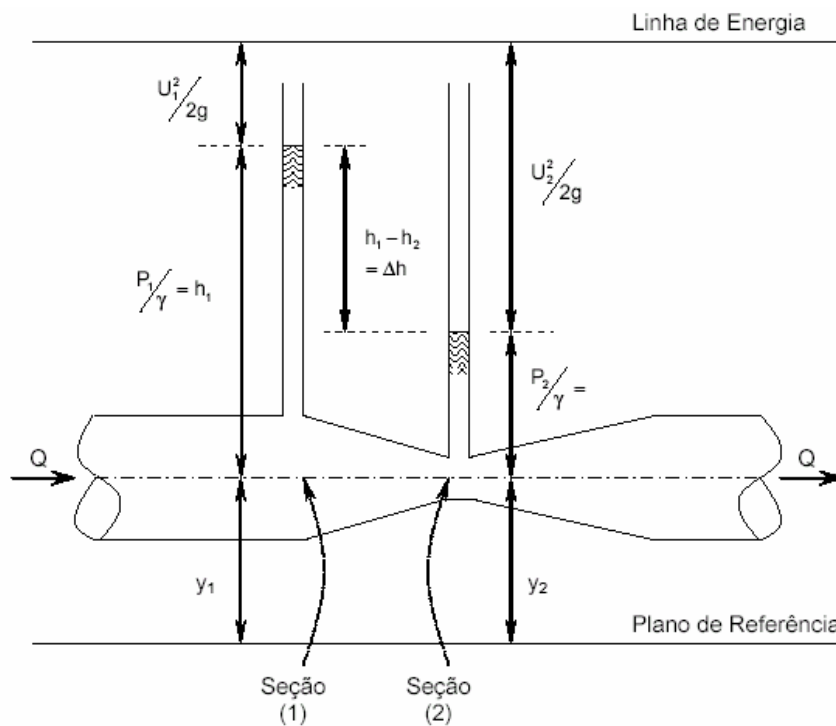


Figura 19. Tubo Venturi

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 retorna ao diâmetro original. Essa alteração de seção causa uma variação de velocidade e, por conseqüência, 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.

Equacionamento Básico

Observando a Figura 19 podemos 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, através da equação de Bernoulli pode-se escrever:

$$y_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \quad (I)$$

Como a tubulação está na horizontal, $y_1 = y_2$. Além disso, pela equação da continuidade tem-se que $Q = A_i \cdot U_i$. Logo:

$$Q = A_1 \cdot U_1 = A_2 \cdot U_2 \Rightarrow U_1 = U_2 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

Substituindo-se U_1 em (1) e considerando-se que $\frac{p_i}{\gamma} = h_i$, tem-se:

$$h_1 + \frac{U_2^2}{2g} \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \Rightarrow$$

$$\frac{U_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = h_1 - h_2 \Rightarrow$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

Assim, a vazão pode ser dada por:

$$Q = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (\text{II})$$

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 (II). Logo, para se determinar o valor real da vazão é necessário multiplicar a vazão

determinada em (II) 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:

$$Q = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

Para se 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.