

**Adriana Cinopoli Gonçalves**

**Tratamento de Efluentes  
Contendo Cianeto Livre Através do Sistema  
H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV**

**Tese de Doutorado**

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DOS  
MATERIAIS E METALURGIA**

Programa de Mestrado do Departamento  
de Ciência dos Materiais e Metalurgia

Rio de Janeiro

8 de setembro de 2004

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Adriana Cinopoli Gonçalves**

**Tratamento de Efluentes Contendo Cianeto Livre Através  
do Sistema H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Alberto Cesar Teixeira

Rio de Janeiro, 08 de setembro de 2004



**Adriana Cinopoli Gonçalves**

**Tratamento de Efluentes Contendo Cianeto Livre  
Através do Sistema H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Luiz Alberto Cesar Teixeira**

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC - Rio

**Lídia Yokoyama**

EQ/UFRJ

**Roberto Emery Trindade**

CETEM

**Oswaldo Galvão Caldas da Cunha**

EQ/UFRJ

**Francisco José Moura**

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC - Rio

**José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de setembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Adriana Cinopoli Gonçalves**

Graduou-se em Engenharia Química pela PUC-Rio. Mestre em Ciência dos Materiais e Metalurgia pela PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Gonçalves, Adriana Cinopoli

Tratamento de efluentes contendo cianeto livre através do sistema H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV / Adriana Cinopoli Gonçalves ; orientador: Luiz Alberto César Teixeira. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2004.

206 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciência dos materiais e metalurgia – Teses. 2. Cianeto livre. 3. Peróxido de hidrogênio. 4. Radiação ultravioleta. 5. Tratamento de efluentes. I. Teixeira, Luiz Alberto César. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

A Deus, por todas as suas bênçãos e ao meu filho Nicola, pela alegria e sentido que ele traz à minha vida.

## **Agradecimentos**

Ao meu marido Bruno, pelo companheirismo, carinho e ajuda, imprescindíveis para a realização deste trabalho;

À minha família, em especial à minha mãe, pelo apoio nos momentos difíceis que ocorreram no decorrer do trabalho;

Ao meu orientador, professor Luiz Alberto Teixeira, pela orientação do estudo.

Ao professor Helio Marques Kohler pela colaboração na etapa final do trabalho.

À GERMETEC e a Peróxidos do Brasil pelo suporte técnico gentilmente oferecido pelas empresas fornecendo equipamento e reagentes, respectivamente, em especial ao Engenheiro Renato da GERMETEC pela atenção.

Ao CNPq e a PUC-Rio, pelo apoio concedido a pesquisa no Brasil.

Aos professores, funcionários e colegas da PUC pela colaboração e apoio, principalmente a Luzinete.

Aos meus companheiros de INPI que acompanharam metade da jornada, particularmente a minha Chefe Neide Aparecida Marcolino Ayres, pela compreensão

## Resumo

Gonçalves, Adriana Cinopoli; Teixeira, Luiz Alberto Cesar. **Tratamento de efluentes contendo cianeto livre através do sistema  $H_2O_2/UV$** . Rio de Janeiro, 2004. 206 p. Tese de Doutorado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho teve como objetivo estudar o tratamento de efluentes contendo cianeto livre através do sistema  $H_2O_2/UV$  e selecionar as condições operacionais mais adequadas para uma maior eficiência do processo. Para isso, foram empregadas soluções sintéticas de KCN com características de pH e concentração similares às condições de um efluente industrial real. O fotoreator utilizado nos testes de oxidação foi um reator cilíndrico de seção anular, equipado com uma lâmpada de baixa pressão de 28 W concêntrica com emissão em 254 nm, onde a solução ficava diretamente em contato com a mesma. Este fotoreator foi acoplado a um sistema de refrigeração que mantinha a temperatura de operação em 25°C. As variáveis avaliadas foram concentração inicial de cianeto em solução, pH inicial da solução, potência de UV irradiada e razão molar  $[H_2O_2]/[CN^-]$ . Para soluções contendo uma concentração inicial de cianeto igual a 100 ppm, foi possível atingir uma eficiência remoção de 99,9 % em 25 minutos, em pH igual a 9,5, com uma razão molar  $[H_2O_2]:[CN^-]$  igual a 3. Para efluentes contendo uma concentração inicial de cianeto igual a 300 ppm, nas mesmas condições operacionais, alcançou-se a mesma eficiência em 30 minutos.

**Palavras-chave:** cianeto livre; peróxido de hidrogênio; radiação ultravioleta; tratamento de efluentes.

## ABSTRACT

Gonçalves, Adriana Cinopoli; Teixeira, Luiz Alberto Cesar. **Treatment of effluents containing free cyanide through the system H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV**. Rio de Janeiro, 2004. 206 p. Doctor Thesis – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work had the objective of studying the treatment of effluents containing free cyanide through the system H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, and of selecting the best operational conditions for best efficiency of the process. For that, it was employed synthetic solutions of KCN with characteristics of pH and concentration similar to those of a real effluent. The photoreactor employed in the oxidation tests was a cylindrical reactor of annular section, equipped with a concentric low pressure lamp of 28 W with emission in 254 nm, where the solution was in direct contact with the lamp. This photoreactor was coupled with a cooling system which kept the operation temperature at 25°C. The evaluated variables were initial cyanide concentration in solution, initial pH of the solution, power of radiated UV and molar ratio [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]/[CN<sup>-</sup>]. For solutions containing an initial concentration of cyanide equal to 100 ppm, it was possible to reach a removal efficiency of 99.9% in 25 minutes, in pH equal to 9.5, with a molar ratio of [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]:[CN<sup>-</sup>] equal to 3. For effluents containing an initial concentration of cyanide equal to 300 ppm, at the same operational conditions, it was possible to achieve the same removal efficiency in 30 minutes.

**Key-words:** free cyanide; hydrogen peroxide; ultraviolet radiation; effluents treatment.

# SUMÁRIO

	Pág.
1 - Introdução.....	20
2 - Geração de efluentes contendo espécies cianídricas.....	22
2.1 - Principais fontes de efluentes cianídricos.....	22
2.2 - Toxicidade do cianeto.....	23
2.3 - Limites de cianeto impostos pelos órgãos ambientais.....	25
3- Aspectos químicos e fotoquímicos do Sistema H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV.....	27
3.1 - Química das Soluções Cianídricas.....	27
3.1.1 - Cianeto Livre.....	28
3.1.2 - Compostos de cianeto simples (solúveis e relativamente solúveis).....	31
3.1.3 - Complexos Ciano-metálicos.....	31
3.1.1.1 - Complexos Ferrocianídricos.....	33
3.1.1.2 - Complexos cianídricos de cobre.....	35
3.1.1.2 - Complexos cianídricos de zinco.....	36
3.2 - Química do Peróxido de Hidrogênio.....	37
3.2.1 - Decomposição fotoquímica do H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	39
3.3 - Oxidação do cianeto livre pelo peróxido de hidrogênio.....	43
3.4 - Princípios de fotoquímica.....	46
3.4.1 - Principais termos empregados em fotoquímica.....	46
3.4.1.1 - Radiação UV.....	46

3.4.1.2 – Transmitância.....	47
3.4.1.3 – Absorvância.....	48
3.4.1.4 - Lei de Beer.....	48
3.4.1.5 - Lei de Beer – Bouger – Lambert.....	49
3.4.1.6 - Interações entre a radiação e parede da célula de absorção.....	50
3.4.2 - Teoria da Absorção Molecular.....	51
3.4.3 - Parâmetros que afetam os rendimentos quânticos experimentais.....	52
4 - Tratamento de Efluentes cianetados.....	54
4.1 - Tratamento de efluentes contendo cianeto.....	54
4.1.1 - Métodos de recuperação.....	55
4.1.1.1 - AVR - Acidificação, Volatilização e Reneutralização.....	55
4.1.1.2 - Troca iônica.....	56
4.1.1.3 - Carvão ativado.....	57
4.1.1.4 - Tratamento eletrolítico.....	57
4.1.1.5 – Flotação.....	59
4.1.2 – Detoxificação.....	60
4.1.2.1 - Degradação natural.....	61
4.1.2.2 - Complexação com ferro.....	61
4.1.2.3 - Oxidação com peróxido de hidrogênio.....	62
4.1.2.4 - Oxidação com SO <sub>2</sub> /ar.....	67
4.1.2.5 - Tratamento biológico.....	67

4.1.2.6 - Cloração alcalina.....	69
4.1.2.7 - Ácido de Caro.....	70
4.1.2.8 - Ozonização.....	71
4.1.2.9 - Outros métodos.....	71
5 - Processos Oxidativos Avançados.....	73
5.1 - Fotodissociação direta.....	75
5.2 - Sistema Ozônio/Ultravioleta.....	77
5.3 - Reagente de Fenton.....	78
5.4 - Fotocatálise com dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ) .....	79
5.5 - Sistema H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV.....	81
5.5.1 - Considerações de projeto de implantação do sistema H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV.....	82
5.5.1.1 - Parâmetros Interferentes.....	82
5.5.2 - Considerações Econômicas.....	91
5.5.3 - Cinética das reações de oxidação.....	92
5.5.4 - Estudos da aplicabilidade do sistema H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV.....	93
5.6 - Comparação entre os métodos de tratamento de efluentes cianetados.....	117
6 - Metodologia experimental.....	121
6.1 - Reagentes para os testes de oxidação.....	122
6.2 - Determinação experimental de cianeto.....	122
6.3 - Transmitância das soluções .....	123
6.4 - Testes preliminares.....	123

6.4.1 - Equipamento empregado nos testes preliminares.....	123
6.4.2 - Planejamento Experimental dos testes preliminares.....	125
6.5 - Testes de oxidação no fotoreator.....	126
6.5.1 - Equipamento para os testes de oxidação.....	126
6.5.2 - Planejamento experimental para os testes de oxidação.....	129
7 - Apresentação e discussão dos resultados.....	131
7.1 - Análise Estatística da Oxidação de Cianeto Através do Sistema $H_2O_2/UV$ .....	131
7.2 - Interpretação físico-química dos resultados.....	149
7.2.1 - Influência da concentração inicial de cianeto.....	152
7.2.2 - Influência do pH inicial da solução.....	156
7.2.3 - Influência da Potência de UV Irradiada.....	159
7.2.4 - Influência da razão molar $[H_2O_2]/[CN]$ .....	162
7.3 -Modelamento matemático da oxidação do cianeto pelo sistema $H_2O_2/UV$ e aplicação deste nos resultados experimentais.....	164
8 – Conclusões.....	170
9 – Referências bibliográficas.....	173
Apêndice 1 - Resultados obtidos nos testes de oxidação no fotoreator.....	181
Apêndice 2 - Resultados obtidos nos testes de oxidação preliminares.....	191
Apêndice 3 - Modelo aplicado em cada experimento.....	192
Apêndice 4 – Equipamento empregado nos testes de oxidação.....	199
Apêndice 5 - Detalhamento da análise estatística dos resultados.....	201

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 - Fração de $\text{CN}^-$ no cianeto livre em função do pH.....	29
Figura 3.2 - Diagrama $e_{\text{H}}$ -pH do sistema $\text{CN-H}_2\text{O}$ a $25^\circ\text{C}$ .....	30
Figura 3.3 - Diagrama $e_{\text{H}}$ -pH do sistema $\text{Fe-CN-H}_2\text{O}$ a $25^\circ\text{C}$ .....	34
Figura 3.4 - Diagrama $e_{\text{H}}$ -pH do sistema $\text{Cu-CN-H}_2\text{O}$ a $25^\circ\text{C}$ .....	36
Figura 3.5 - Diagrama $e_{\text{H}}$ -pH do sistema $\text{Zn-CN-H}_2\text{O}$ a $25^\circ\text{C}$ .....	37
Figura 3.6 - Coeficiente de extinção em função do comprimento de onda nas fases aquosa e gasosa.....	40
Figura 3.7 - Célula de absorção.....	47
Figura 3.8 - Tipos de interações entre as paredes da célula e a radiação.....	50
Figura 4.1 - Efeito do pH sobre a cinética de oxidação de cianeto livre.....	63
Figura 4.2 - Efeito da relação molar $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-]$ sobre a cinética de oxidação do cianeto.....	64
Figura 4.3 - Efeito da adição de catalisador de $\text{Cu}^{2+}$ sobre a cinética de oxidação do cianeto.....	65
Figura 5.1 - Esquema de um foto-reator anular.....	95
Figura 5.2 - Esquema de reator plano.....	97
Figura 5.3 - Fotodecomposição do $\text{H}_2\text{O}_2$ pela luz UV em pH 2,5, 7,0 e 10,5.....	100
Figura 6.1- Esquema do equipamento empregado nos testes preliminares de oxidação.....	124
Figura 6.2 - Esquema do equipamento empregado nos testes de oxidação.....	127
Figura 7.1 - Curva de regressão linear que define a correlação entre os dados experimentais obtidos e os previstos pelo modelo GLZ.....	134
Figura 7.2 - Gráfico da influência da variável concentração inicial de cianeto na velocidade inicial de oxidação.....	137

Figura 7.3 - Gráfico da influência da variável pH inicial da solução na velocidade inicial de oxidação do cianeto.....	138
Figura 7.4 - Gráfico da influência da variável potência de UV irradiada na velocidade inicial de oxidação.....	138
Figura 7.5 - Gráfico da influência da variável concentração inicial de cianeto na velocidade inicial de oxidação.....	139
Figura 7.6 - Gráfico de Pareto.....	140
Figura 7.7 - Gráfico da probabilidade normal dos efeitos.....	141
Figura 7.8 - Variação da velocidade de oxidação em relação à interação das variáveis $[CN^-]$ e pH, quando as variáveis “potência de UV irradiada” e “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seus níveis.....	143
Figura 7.9 - Variação da velocidade de oxidação em relação a interação das variáveis $[CN^-]_0$ e pH, quando a variável “potência de UV irradiada” está em seu nível superior e a variável “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” está em seu nível inferior	143
Figura 7.10 - Variação da velocidade de oxidação em relação a interação das variáveis $[CN^-]_0$ e pH, quando a variável “potência de UV irradiada” está em seu nível inferior e a variável “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” está em seu nível superior	144
Figura 7.11 - Comportamento da variável de resposta em relação a interação das variáveis $[CN^-]_0$ e pH, quando as variáveis “potência de UV irradiada” e “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seus níveis superiores.....	144
Figura 7.12 - Variação da velocidade de oxidação em relação a interação das variáveis $[CN^-]_0$ e potência de UV irradiada, quando as variáveis pH e razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ estão em seus níveis inferiores.....	145
Figura 7.13 - Comportamento da variável de resposta em relação a interação das variáveis “concentração de cianeto” e “potência de UV irradiada”, quando a variável pH está em seu nível inferior e a variável “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” está em seu nível superior.....	145
Figura 7.14 - Comportamento da variável de resposta em relação a interação das variáveis $[CN^-]$ e “potência de UV irradiada”, quando a variável pH está em seu nível superior e a “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” está em seu nível inferior.....	146

Figura 7.15 - Comportamento da variável de resposta em relação a interação das variáveis $[CN^-]$ e “potência de UV irradiada, quando as variáveis pH e “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seus níveis superiores.....	146
Figura 7.16 - Variação da velocidade de oxidação em relação à interação das variáveis “potência de UV irradiada” e pH , quando as variáveis $[CN^-]_0$ e “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seus níveis inferiores.....	147
Figura 7.17 - Variação da velocidade de oxidação em relação à interação das variáveis “potência de UV irradiada” e pH , quando a variável $[CN^-]_0$ está em seu nível inferior e a variável “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seu nível superior..	147
Figura 7.18 - Variação da velocidade de oxidação em relação à interação das variáveis “potência de UV irradiada” e pH , quando a variável $[CN^-]_0$ está em seu nível superior e a variável “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seu nível inferior.....	148
Figura 7.19 - Variação da velocidade de oxidação em relação à interação das variáveis “potência de UV irradiada” e pH , quando as variáveis $[CN^-]_0$ e “razão molar $[H_2O_2]:[CN^-]$ ” estão em seus níveis superiores.....	148
Figura 7.20 - Efeito da interação das 3 variáveis: concentração inicial de cianeto, pH inicial da solução e potência de UV irradiada na velocidade inicial de oxidação.....	149
Figura 7.21 - Curva de variação da concentração de cianeto em função do tempo. Parâmetros fixos: $[CN^-] = 100$ mg/L Razão molar $[H_2O_2]:[CN^-] = 1:1$ .....	150
Figura 7.22 - Curva de variação da concentração de cianeto em função do tempo. Parâmetros fixos: $[CN^-] = 100$ mg/L Razão molar $[H_2O_2]:[CN^-] = 3:1$ .....	150
Figura 7.23 - Curva de variação da concentração de cianeto em função do tempo. Parâmetros fixos: $[CN^-] = 300$ mg/L Razão molar $[H_2O_2]:[CN^-] = 1:1$ .....	151
Figura 7.24 - Curva de variação da concentração de cianeto em função do tempo. Parâmetros fixos: $[CN^-] = 300$ mg/L Razão molar $[H_2O_2]:[CN^-] = 3:1$ .....	151
Figura A.1.1 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[CN^-] = 100$ ppm pH = 9,5 UV = 0 w $[H_2O_2]/[CN^-] = 1:1$ .....	163

- Figura A.1.2 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 9,5$   
 $\text{UV} = 0 \text{ w}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 182
- Figura A.1.3 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 11$   
 $\text{UV} = 0 \text{ w}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 182
- Figura A.1.4 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 11$   
 $\text{UV} = 0 \text{ w}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 183
- Figura A.1.5 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 9,5$   
 $\text{UV} = 28 \text{ W}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 183
- Figura A.1.6 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 9,5$   
 $\text{UV} = 28 \text{ W}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 184
- Figura A.1.7 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 11$   
 $\text{UV} = 28 \text{ W}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 184
- Figura A.1.8 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 11$   
 $\text{UV} = 28 \text{ W}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 1:1$ ..... 185
- Figura A.1.9 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo.  
 Condições experimentais:  $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$   
 $\text{pH} = 9,5$   
 $\text{UV} = 0 \text{ W}$   
 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ ..... 185

Figura A.1.10 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 9,5$ $\text{UV} = 0 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	186
Figura A.1.11 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 11$ $\text{UV} = 0$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	186
Figura A.1.12 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 9,5$ $\text{UV} = 28 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	187
Figura A.1.13 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 11$ $\text{UV} = 0 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	187
Figura A.1.14 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 300 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 9,5$ $\text{UV} = 28 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	188
Figura A.1.15 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 11$ $\text{UV} = 28 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	188
Figura A.1.16 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 100 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 9,5$ $\text{UV} = 28 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 3:1$ .....	189
Figura A.1.17 – Curva de decaimento da concentração de cianeto em função do tempo dos pontos centrais. Condições experimentais: $[\text{CN}^-] = 200 \text{ ppm}$ $\text{pH} = 10,2$ $\text{UV} = 14 \text{ W}$ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{CN}^-] = 2:1$ .....	190
Figura A.4.1- Foto do sistema fotorreator/equipamento de refrigeração.....	199

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Processos e indústrias que geram efluentes contendo espécies cianídricas.....	22
Tabela 2.2 - Limites de concentração de cianeto total para descarte de efluentes.....	25
Tabela 3.1 - Efeito da $[H_2O_2]$ e da radiação UV na oxidação do cianeto.....	45
Tabela 5.1 - Potenciais de oxidação de várias substâncias.....	75
Tabela 5.2 - Lista de compostos orgânicos que têm sido tratados pelo sistema $H_2O_2/UV$ .....	94
Tabela 5.3 - Variáveis operacionais selecionadas por KURBUS et al (2002), suas faixas de variação, a influência destas no processo da descoloração da solução e as justificativas para tal comportamento.....	103
Tabela 5.4 - Resultados obtidos por KURBUS et al (2003) e a comparação entre 3 processos de oxidação – $H_2O_2/UV$ , $H_2O_2/O_3$ e $H_2O_2/Fe^{2+}$ .....	108
Tabela 5.5 - Revisão de modelos cinéticos desenvolvidos para descrever a oxidação de compostos.....	116
Tabela 5.6 - Comparação entre os processos mais usados para tratamento de efluentes contendo espécies cianídricas e os métodos com potencial de aplicação.....	118
Tabela 6.1 - Variáveis e faixas de variação dos testes preliminares.....	125
Tabela 6.2 - Variáveis e faixas de variação dos testes de oxidação no fotoreator.....	129
Tabela 6.3 - Planejamento fatorial dos testes de oxidação do cianeto no fotoreator.....	130
Tabela 7.1 - Condições experimentais adotadas em cada teste com suas respectivas velocidades iniciais.....	132
Tabela 7.2 – Resultados da análise de variâncias ANOVA e do teste F.....	135

Tabela 7.3 - Efeitos de todas as variáveis e de suas interações na velocidade inicial e seus respectivos erros padrões.....	137
Tabela 7.4 - Condições experimentais dos gráficos de interação entre variáveis.....	144