

5

Resultados e Discussão

A primeira batelada de testes foi feita com anodos de alumínio sendo analisados a cada 10 minutos os parâmetros: DQO, Turbidez e pH.

Outros parâmetros também foram abordados, tais como: densidade de corrente elétrica, distância entre os eletrodos, concentração inicial de óleo, relação área-volume, consumo de eletrodos, custo da operação e consumo de energia.

A segunda batelada foi feita com anodos de ferro, foram abordados sob as mesmas condições operacionais, descritos anteriormente.

A DQO e turbidez obtida, nas diferentes concentrações de óleo testadas, são apresentadas na tabela 5.1 Os resultados serão analisados em termos de eficiência de redução destas variáveis.

A seguir, uma análise individual de cada parâmetro.

5.1

Efeito da Densidade de Corrente Elétrica

Este tema é bastante controverso entre os pesquisadores. Daneshvar et al. [73] mostraram que a remoção de um tipo de corante aumentou significativamente, de 40% para 95%, com o acréscimo da densidade de corrente elétrica de 10 A/m² para 30 A/m², e a DQO diminuiu de 175 mg/l para 30 mg/l. Ou seja, neste caso, a densidade de corrente mostrou-se eficiente na remoção.

Daneshvar et al. [54] também concluíram que o acréscimo da densidade de corrente de 40 A/m² para 60 A/m² aumenta a eficiência de remoção da

Tabela 5.1: Turbidez e DQO obtida a diferentes concentrações de óleo.

Concentração do óleo (g/l)	Turbidez NTU	DQO mg/l
1,5	400	3850
3	550	5560
6	575	10120
9	680	13860
10	980	14300

Tabela 5.2: Experiências com anodos de Al, avaliando o efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO e turbidez.

Número de Experimento	Número de eletrodos	Dens. de Corr. mA/cm ²	%Redução DQO	%Redução Turbidez
1a	4	2,5	11,5	30,1
2a	4	4,3	92,7	99,2
3a	4	6,4	98,7	88,5
4a	4	9,4	98,6	97,8
5a	4	12,9	98,2	97,6
16a	6	2,5	91,2	96,3
17a	6	4,3	98,1	95
18a	6	6,4	98,8	99,7
19a	6	9,4	98,1	91,9
20a	6	12,9	98,8	97,9

cor de 52,10 para 91,12%. Isto foi justificado pelo fato da intensificação da densidade de corrente elétrica por provocar maior eficiência de produção de íons no anodo e no catodo.

Kobyta et al. [30] verificaram que o aumento da densidade de corrente de 25 para 100 A/m² alterou significativamente a eficiência de remoção da descoloração de 60% para 96%, porém para valores de 100 A/m² até 250 A/m² a eficiência manteve-se constante.

Já para os autores Chen et al. [19], a densidade de corrente quase não afeta as remoções de DQO, de óleos e graxas, embora ela tenha sido variada de 12,5 a 108,9 A/m² em uma densidade de carga fixa de 6,63 F/m³. Isto indica que, de acordo com o autor, não é a densidade de corrente mas sim a de carga que realmente afeta a eficiência do tratamento, porém o acréscimo na densidade de corrente favoreceu o tempo de tratamento que diminuiu de 60 para 6,5 minutos.

Nesta dissertação, fez-se uma comparação para os dois tipos de materiais de anodos.

5.1.1

Anodos de Alumínio

Na tabela 5.2, é apresentado o resumo das experiências trabalhando com anodos de alumínio para 80 minutos de operação e 5 mm de distanciamento entre os eletrodos.

Na figura 5.1 usando 4 eletrodos no sistema, mostra-se que a eficiência de redução da DQO é maior com o aumento da densidade de corrente. As curvas alcançam um mesmo valor assintótico, aproximadamente em 95%. O tempo

mínimo de operação na qual esses valores de redução são alcançados, diminuiu de 80 para 20 minutos, quando a densidade de corrente aumenta de 2,5 para 12,9 (mA/cm^2).

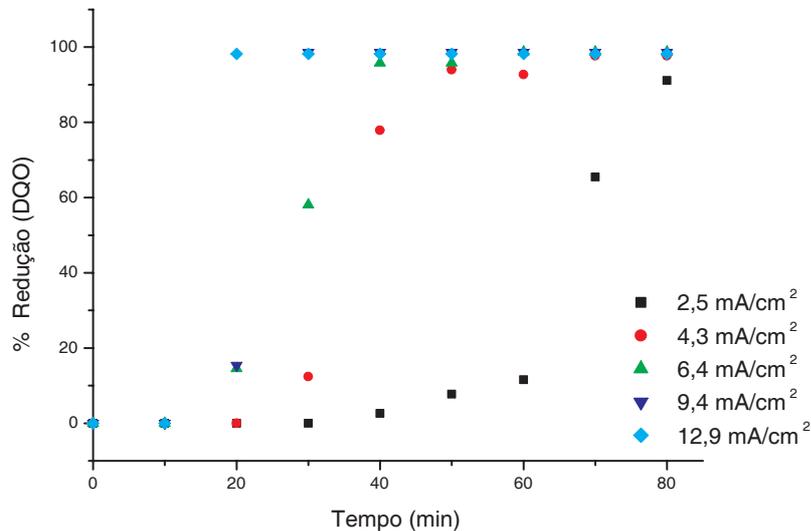


Figura 5.1: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfactante]=1g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e= 5$ mm.

O processo de eletrocoagulação para esse caso exibe três fases: (I) a fase inicial - na qual não se observa remoção do poluente, cuja concentração de DQO permanece quase constante, já que para dar início à quebra da emulsão precisa-se de certa quantidade de alumínio em solução. (II) a fase reativa - onde ocorre a maior redução da DQO. (III) fase estável - é a em que não se consegue alcançar maior remoção do poluente .

Este tipo de comportamento das curvas (chamadas na literatura, curvas “S”), podem ser visualizadas de uma melhor forma quando trabalhamos com densidades superiores a $4,3 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Este comportamento já foi observado por Gutierrez [74].

No caso do aumento do número de eletrodos na célula (6 eletrodos) na figura 5.2, mostra-se que a maior redução da DQO (maiores a 85%) acontece nos primeiros 30 minutos para as densidades 6,4 ; 9,4 e $12,9 \text{ mA}/\text{cm}^2$, sendo que o tempo requerido para as densidades $4,3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ e $2,5 \text{ mA}/\text{cm}^2$, aumentou para 40 e 60 minutos respectivamente.

No que diz respeito à turbidez, usando 4 eletrodos na figura 5.3, mostra-se uma maior redução com o aumento da densidade de corrente elétrica. Esta redução foi alcançada, 80% - 99%, com as densidades de 9,4 e $12,9 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

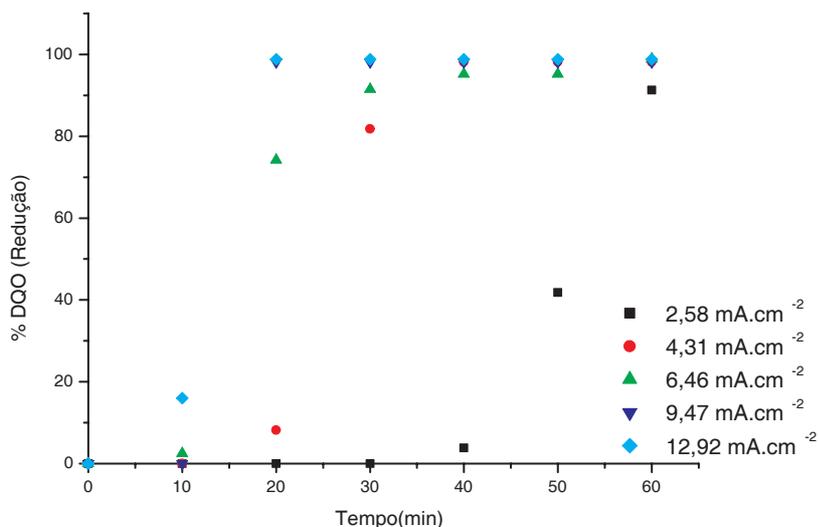


Figura 5.2: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 6 eletrodos, $d_e = 5$ mm.

Já para a densidade de corrente de 2,5 mA/cm² a redução conseguida foi somente 40%.

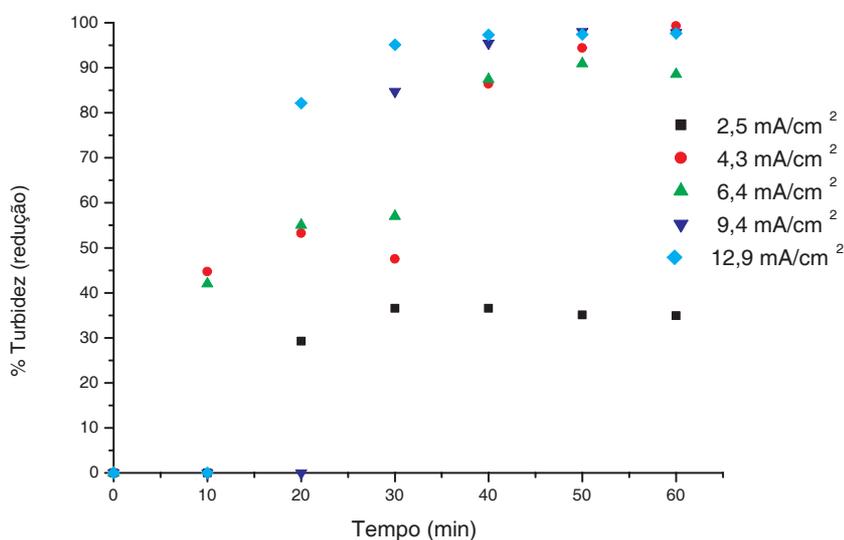


Figura 5.3: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.

As mudanças da turbidez da solução usando 6 eletrodos na célula, são

mostradas na figura 5.4. O comportamento com relação a densidade de corrente é similar à redução de DQO. Este tipo de comportamento já foi descrito por trabalhos anteriores.

Holt et al. [70] obtiveram um perfil esperado da turbidez em processos convencionais de coagulação, onde se identificam três fases: a primeira denominada fase lag - onde pouca ou nenhuma turbidez é removida; em seguida a fase reativa - onde há a redução de aproximadamente 95% da turbidez; e por último a estacionária - onde não há mais alterações significativas no seu valor.

Dimoglo et al. [29] verificou que um aumento na densidade de corrente de 5 para 15 mA/cm² aumentou em 14% a redução da turbidez.

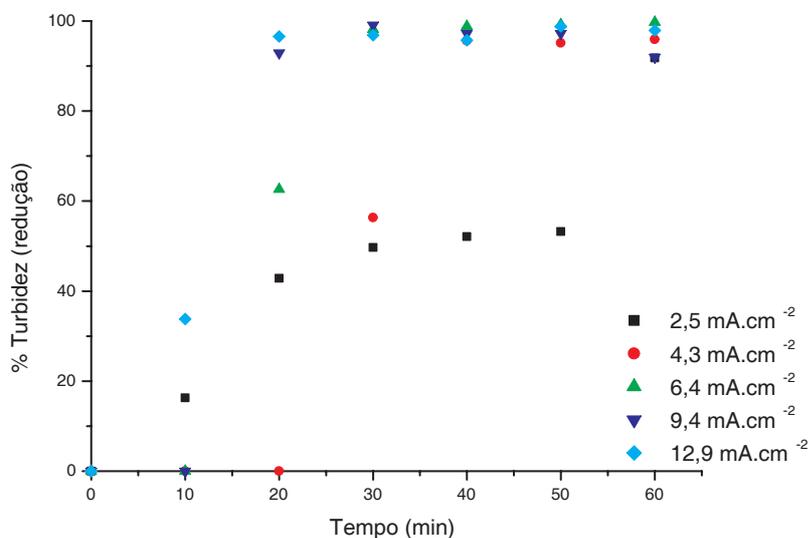


Figura 5.4: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al 6 eletrodos, $d_e = 5$ mm.

A partir da análise das figuras 5.1 até 5.4 pode-se concluir que maiores remoções em um tempo menor são conseguida com as densidades de corrente mais altas, (12,2 mA/cm² e 9,4 mA/cm²) e com o uso de 6 eletrodos no sistema. Neste trabalho foi proposto a densidade de 9,4 mA/cm² já que tem um efeito muito similar à 12,2 mA/cm², porém com menor consumo de energia, ver tabela 5.4.

5.1.2 Anodos de Ferro

Na tabela 5.3 é apresentado o resumo dos dados obtidos em 60 minutos de operação, trabalhando com anodos de ferro.

Tabela 5.3: Resumo de experiências com eletrodos de ferro, avaliando o efeito da densidade de corrente na eficiência da redução da DQO e turbidez

Experimento	Número de eletrodos	Dens. de Corr. mA/cm ²	%Redução DQO	%Redução Turbidez
1b	4	2,5	25,0	59,1
2b	4	4,3	35,7	86,8
3b	4	6,4	75,7	87,7
4b	4	9,4	98,1	94,0
5b	4	12,9	98,2	95,5
16b	6	2,5	62,6	52,2
17b	6	4,3	96,9	92,0
18b	6	6,4	97,9	93,8
19b	6	9,4	98,2	98,5
20b	6	12,9	98,8	79,8

O efeito da densidade de corrente na redução da DQO usando 2 anodos de ferro, pode ser visto na figura 5.5. O comportamento é similar ao dos anodos de alumínio, ou seja, a densidade de corrente afeta diretamente a cinética do processo. Assim, para densidades de corrente de 12,9 e 9,4 (mA/cm²) remoções superiores a 90% são obtidas em 30 e 40 minutos; já para densidades menores 6,4; 4,3 e 2,5 (mA/cm²), a eficiência de redução foi 76%, 36% e 25% para 60 minutos de operação.

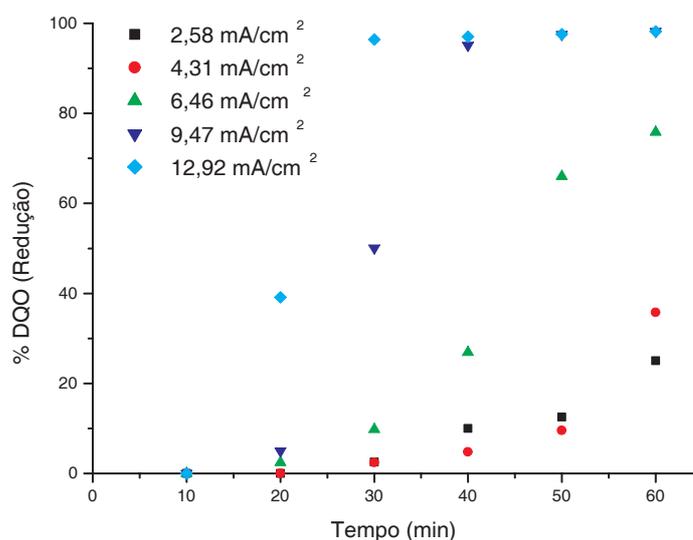


Figura 5.5: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de ferro, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm

Já para o uso de 3 anodos, obtém-se uma melhora apreciável na cinética da redução da DQO, comparado com o uso de 2 anodos de ferro. Isto é mostrado na figura 5.6, onde as remoções são em torno de 98% para tempos de 20, 30, 40, e 50 minutos nas densidades de 12,9; 9,4; 6,4 e 4,3 (mA/cm^2). Para a densidade de 2,5 mA/cm^2 se obtém eficiência de 60% em um tempo de 60 minutos.

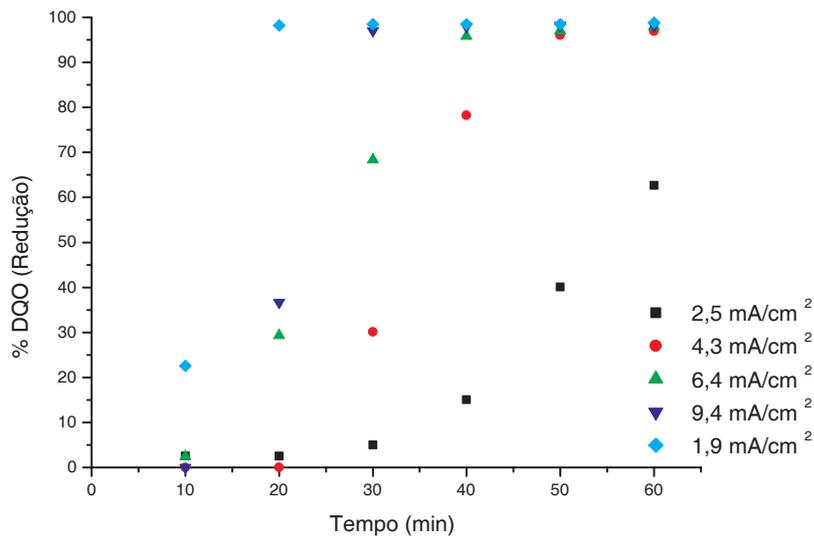


Figura 5.6: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; anodos de ferro, 6 eletrodos; $d_e= 5$ mm.

O comportamento na eficiência de redução da turbidez é apresentado na figura 5.7 (2 anodos de Fe ou 4 eletrodos na célula). Para as densidades de corrente superiores a 2,5 mA/cm^2 as curvas apresentam um mesmo padrão de comportamento, obtendo uma redução em torno de 70% nos primeiros 30 minutos e valores superiores a 85% em 60 minutos de operação. Para a densidade de 2,5 mA/cm^2 , a eficiência máxima de redução foi de 70% em 50 minutos de experiência.

Na figura 5.8 mostra-se o efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez (com o uso de 6 eletrodos no sistema). Observa-se um aumento na turbidez depois dos 50 minutos, ocorrido provavelmente por um excesso na produção de hidróxido de ferro. A menor eficiência na redução da turbidez (60%) é obtida com uma densidade de 2,5 mA/cm^2 , em 50 minutos, e remoções superiores a 90% nos primeiros 40 minutos, com as densidades maiores a 2,5 mA/cm^2 .

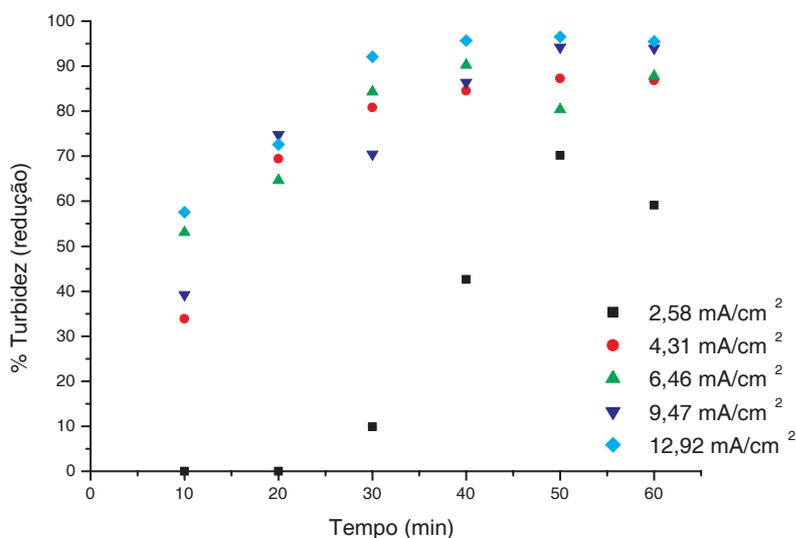


Figura 5.7: Efeito da Densidade de corrente na eficiência de redução da Turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de ferro, 4 eletrodos, $d_e= 5$ mm.

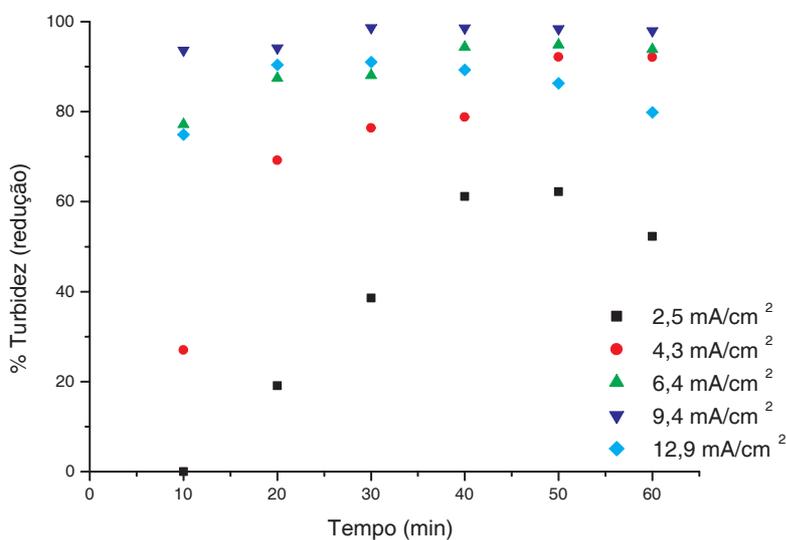


Figura 5.8: Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de ferro; 6 eletrodos; $d_e= 5$ mm.

A partir da análise das figuras 5.5 até 5.8, e avaliando as eficiência de redução da DQO, e da turbidez, além do consumo de energia (tabela 5.5), foi proposto a densidade de 9,4 mA/cm² como o melhor parâmetro de operação.

Assim pode-se concluir que, para ambos os materiais, a densidade de corrente e numero de eletrodos no sistema, exibem um forte efeito na eletrocoagulação, principalmente na cinética da redução dos parâmetros avaliados. Quanto maior a densidade de corrente e quantidade de eletrodos no sistema, menor o tempo de tratamento, devido ao fato de que com maior densidade de corrente elétrica a dissolução dos anodos aumenta, produzindo maior quantidade de precipitados para a remoção de poluentes. Além disso, a taxa de geração de bolhas aumenta e o tamanho das bolhas diminui. Tais efeitos são favoráveis para a desestabilização da emulsão.

5.2

Consumo de Energia

Para se obter a redução máxima da DQO e turbidez, é necessário consumir certa quantidade de energia elétrica durante certo tempo. Alguns autores têm relacionado o aumento do consumo de energia com o tempo de residência do efluente, ou seja, quanto maior o tempo de eletrólise, maior será o consumo de energia, sendo que esta relação é praticamente linear. Segundo Kobya et al. [30], um aumento de 25 mA/cm² para 300 mA/cm² na densidade de corrente eleva o consumo de energia de 1,5 kWh/m³ para 41 kWh/m³ e o consumo do eletrodo de 0,2 kg.Al/m³ para 1,6 kg.Al/m³. No trabalho de Hosny [75], foi verificado que o consumo de energia muda de 4.25 kWh/m³ para 2.66 kWh/m³, sem e com o uso de cloreto de sódio como eletrólito de suporte. Asselin et al. [76] determinou o consumo de energia para um sistema monopolar, sendo 1.72 kWh/m³ para o caso de eletrodos de ferro e 1.99 kWh/m³ para eletrodos de alumínio, trabalhando com 1 A de corrente.

Na tabela 5.4 é apresentado o consumo de energia elétrica para 60 minutos de operação, trabalhando com anodos de alumínio nas diferentes densidade de corrente testadas. É apreciável o maior consumo de energia no sistema com 6 eletrodos comparado ao de 4 eletrodos, sendo o aumento em torno de 85%.

Na tabela 5.5, é apresentado o consumo de energia elétrica para 60 minutos de operação, trabalhando com anodos de ferro. Nota-se também que com o aumento da densidade de corrente elétrica, cresce o consumo de energia. Este crescimento é maior quando o sistema opera com 6 eletrodos (em torno de 65%). Isto é esperado, já que para obter a mesma densidade de corrente elétrica o requerimento de energia é maior no caso do uso de 6 eletrodos no

Tabela 5.4: Consumo de energia usando anodos de alumínio, $t = 60$ min, $d_e = 5$ mm

Número de eletrodos	Dens. de Corr. mA/cm ²	Amperagem (A)	Voltagem (V)	Consumo de Energia kWh/m ³
4	2,5	1,2	1,4	0,33
4	4,3	2	1,28	0,5
4	6,4	3	2,5	1,47
4	9,4	4,4	3,4	2,93
4	12,9	6	4,2	4,94
6	2,5	2	1,6	0,63
6	4,3	3,4	1,4	0,93
6	6,4	5	2,6	2,55
6	9,4	7,3	3,4	4,87
6	12,9	10	5	9,8

sistema, para ambos materiais. Nota-se que o consumo de energia elétrica é maior quando anodos de ferro são usados.

5.3

Efeito da distância dos eletrodos

A eficiência do processo de eletrocoagulação pode ser afetada tanto pelo arranjo dos eletrodos no interior da célula, quanto pela distância entre eles. Os eletrodos precisam de uma distância mínima para a prevenção de um contato físico entre eles.

A seguir é apresentada uma avaliação deste parâmetro no processo.

5.3.1

Anodos de Alumínio

Na tabela 5.6, apresenta-se o resumo das experiências com anodos de alumínio em 60 minutos de operação.

Pode-se observar pela análise da figura 5.9, que não houve efeito algum da distância entre os eletrodos na eficiência de redução da DQO, uma vez que o comportamento é muito similar para todos os casos de afastamento entre eletrodos (faixa de 5 até 25 mm e 4 eletrodos na célula), o que já foi observado por Den & Huang [77]. Nota-se, que reduções em torno de 90% são conseguidas em 30 minutos de operação, para todos os casos.

No caso de 6 eletrodos, o efeito da distância na eficiência de redução também não é perceptível, figura 5.10. Porém, observa-se que a cinética da remoção é influenciada comparada com o uso de 4 eletrodos, pois altas

Tabela 5.5: Consumo de energia usando anodos de Fe, nas distintas densidades; em 60 min de operação.

Número de eletrodos	Dens. de Corr. mA/cm ²	Amperagem (A)	Vtagem (V)	Consumo de Energia kWh/m ³
4	2,58	1,2	1,8	0,42
4	4,39	2	2,2	0,86
4	6,46	3	3,4	2,07
4	9,4	4,4	4,8	4,14
4	12,9	6	4,95	5,82
6	2,5	2	1,8	0,71
6	4,3	3,4	2,3	1,53
6	6,4	5	3,1	3,04
6	9,4	7,3	3,9	5,58
6	12,9	10	5,6	10,98

Tabela 5.6: Experiências com anodos de Al avaliando a distância entre os eletrodos

Experimento	Número de eletrodos	Distância entre eletrodos (mm)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
6a	4	5	98,6	98,3
7a	4	10	98,8	99,3
8a	4	15	98,6	97,4
9a	4	20	98,9	98,9
10a	4	25	98,8	98,7
21a	6	5	98,1	91,9
22a	6	10	99,4	98,9
23a	6	15	99,7	97,8
24a	6	20	99,4	99,5
25a	6	25	98,8	98,6

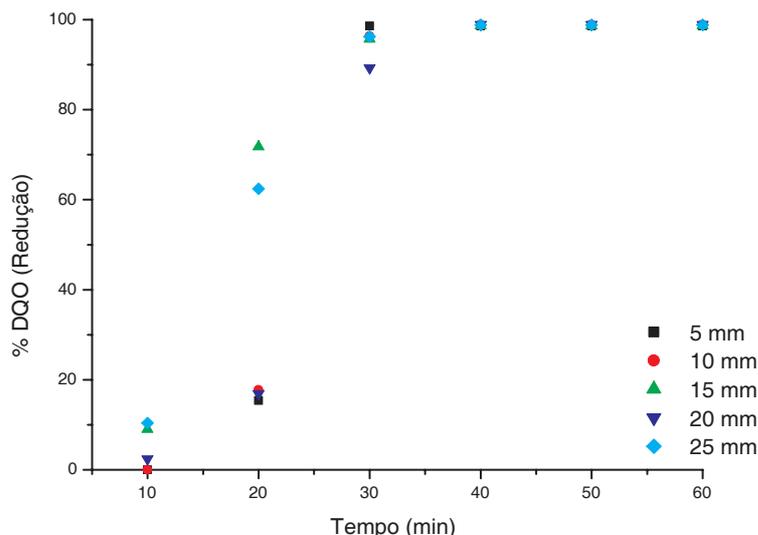


Figura 5.9: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, 4 eletrodos de Al, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$

eficiências de redução da DQO são obtidas (em torno de 90%) em 20 minutos para toda a faixa de distanciamento dos eletrodos.

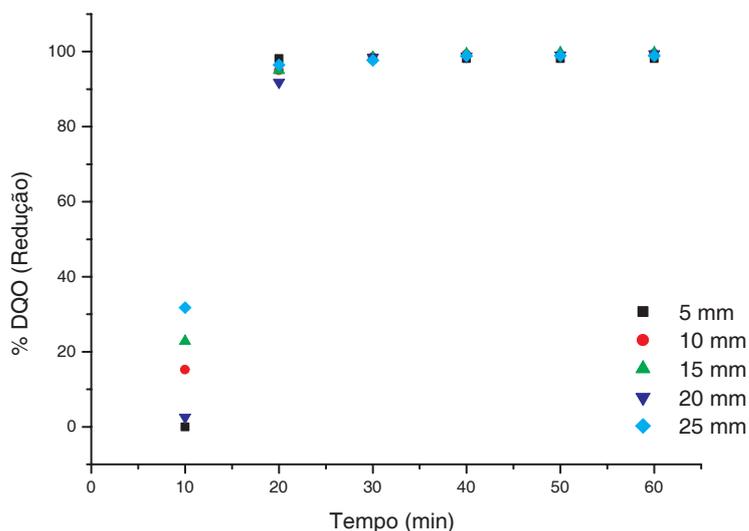


Figura 5.10: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo; [surfatante]= 1 g/l, [óleo]=1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 6 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$.

Pode-se ver na figura 5.11 o comportamento das curvas da eficiência de

redução da turbidez similar ao caso da redução de DQO. Não é possível verificar um efeito no afastamento dos eletrodos. Além disso, nota-se que reduções superiores a 80% da turbidez são conseguidas em 30 minutos de trabalho para todos os casos de afastamento dos eletrodos.

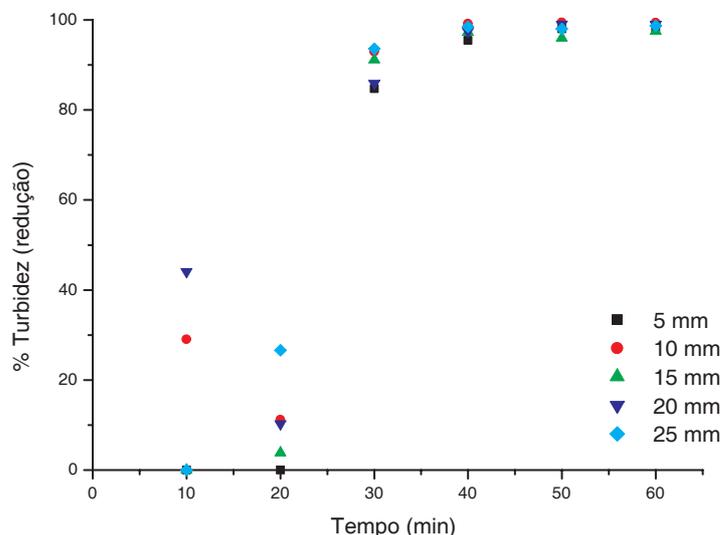


Figura 5.11: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$

O efeito da distância entre os eletrodos na eficiência de redução da turbidez é mostrado na figura 5.12, sem nenhum efeito significativo apreciável. Ao mesmo tempo, observam-se reduções em torno de 80% nos primeiros 20 minutos em todos os casos de afastamento dos eletrodos.

5.3.2 Anodos de Ferro

Na tabela 5.7, apresenta-se os dados obtidos depois de 60 minutos de operação validando o afastamento dos eletrodos usando anodos de ferro.

Da mesma maneira observada nos anodos de alumínio, o efeito da distância entre os eletrodos (2 anodos de ferro) não é apreciável na eficiência de redução da DQO, figura 5.13. Além disso, o tempo necessário para obter reduções da DQO em torno de 90%, é 40 minutos em toda a faixa de afastamento.

No caso do uso de três anodos de ferro ou 6 eletrodos no sistema, os resultados são similares aos anteriores. Na redução da DQO independentemente do número de eletrodos usados e tipo de material, não é possível obser-

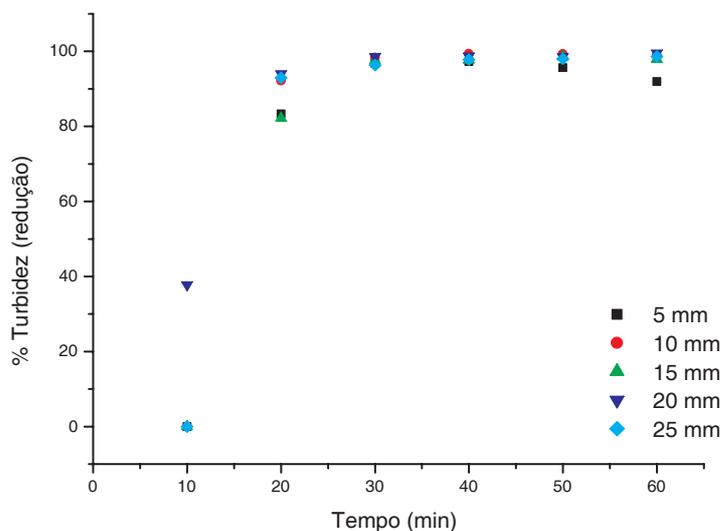


Figura 5.12: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al; 6 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$.

Tabela 5.7: Resumo de experiências com eletrodos de Fe avaliando a distância entre os eletrodos

Experimento	Número de eletrodos	Distância entre eletrodos (mm)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
6b	4	5	98,1	94,0
7b	4	10	97,9	87,0
8b	4	15	97,0	86,6
9b	4	20	98,5	95,6
10b	4	25	97,6	93,2
21b	6	5	98,2	98,5
22b	6	10	99,1	93,4
23b	6	15	98,8	94,4
34b	6	20	98,1	90,1
25b	6	25	98,2	98,9

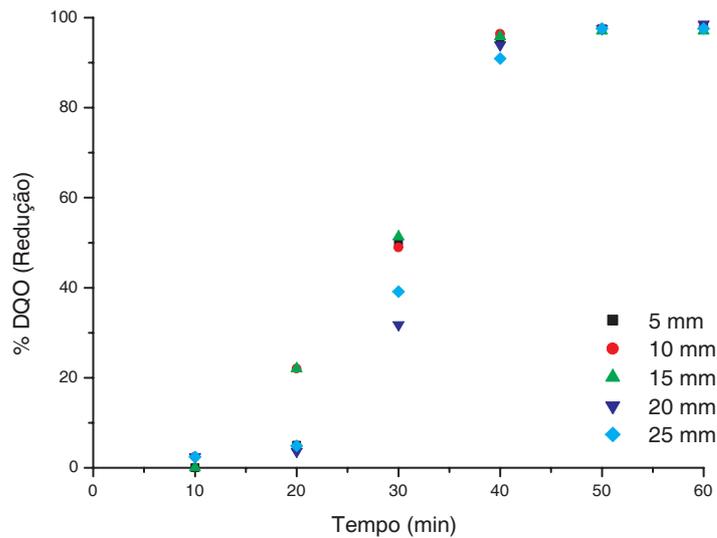


Figura 5.13: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de ferro 4 eletrodos ; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$

var efeito significativo de afastamento dos eletrodos na eficiência da remoção, figura 5.14. Comparado com o uso de 4 eletrodos nota-se uma diminuição no tempo necessário para alcançar máximas reduções da DQO (em torno de 98%), sendo de 30 minutos.

Já para o caso da redução da turbidez com 2 anodos de ferro, podemos observar que se trata de um processo mais complexo (nota-se a dispersão dos dados), figura 5.15, isto pode ser explicado pela coloração dos íons Fe(II) e Fe(III) gerados eletroliticamente, que são necessários para a remoção de óleo afetando assim a eficiência de redução da turbidez.

Analisando o efeito do uso de mais 2 eletrodos no sistema (6 eletrodos) para a redução da turbidez, é observado acréscimos e decréscimos deste parâmetro na faixa estudada, isto é visto na figura 5.16. Nota-se também que é conseguido reduções em torno de 95% em 30 minutos de operação.

Baseado nos resultados anteriores, pode-se concluir que o afastamento dos eletrodos não teve influência na eficiência de redução das variáveis analisadas; discordando com Xu - Zhu & Mordirshahla [22, 78], que afirmaram que com o maior afastamento dos eletrodos, ocorreu uma diminuição da remoção de poluentes, devido às menores interações entre as espécies. No trabalho de Gutierrez conclui-se que o afastamento dos eletrodos influencia no consumo de energia, mas não mostra um grande efeito na eficiência de remoção de óleo, devido ao desenho dos eletrodos e a boa agitação na célula [74].

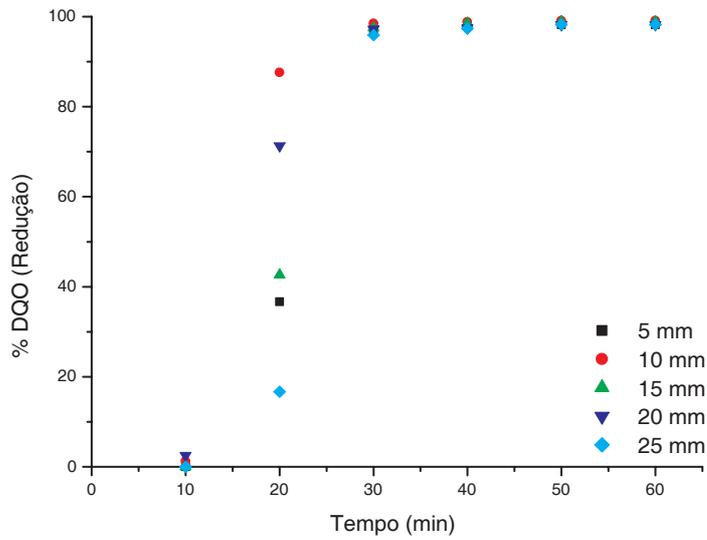


Figura 5.14: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l; Anodos de ferro, 6 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$

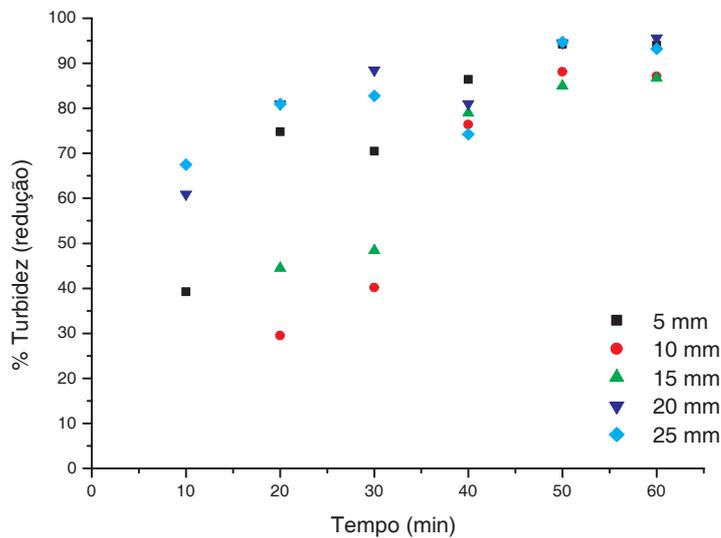


Figura 5.15: Efeito da distância dos eletrodos(Fe) na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l, anodos de Fe, 4 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$

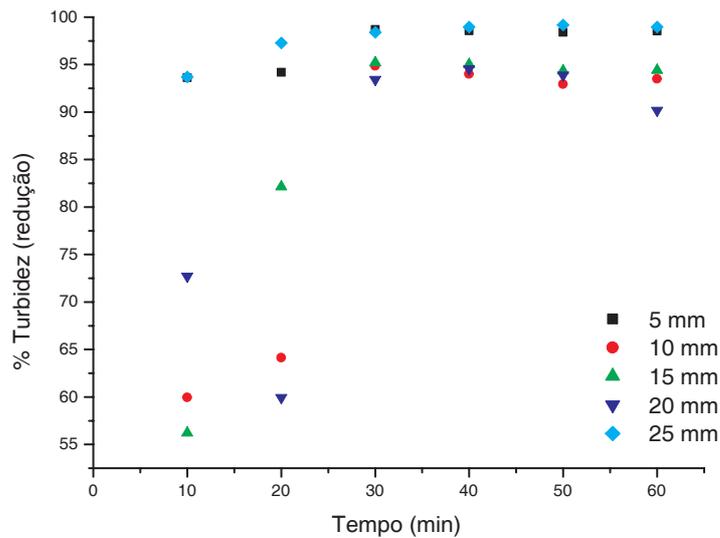


Figura 5.16: Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l, Anodos de ferro; 6 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$

5.3.3

Efeito da distância entre os eletrodos no consumo de energia

O efeito do afastamento dos eletrodos no consumo de energia também foi avaliado para cada material. Na figura 5.17 apresenta-se o efeito do afastamento dos eletrodos (anodos de Al) no consumo de energia. Quanto maior a distância, maior o consumo de energia. O mesmo acontece quando é usado anodos de ferro, isto é, representado na figura 5.18.

Neste trabalho não se encontrou efeito da distância entre os eletrodos, para os dois tipos de material na eficiência da remoção, mas sim no consumo de energia.

Sendo 5 mm e 10 mm as separações que apresentam menor consumo de energia. Foi escolhida a separação de 10 mm como o melhor parâmetro, por apresentar menor dificuldade no montagem dos eletrodos e maior facilidade no controle do processo.

5.4

Efeito da concentração inicial de óleo

O efeito da concentração inicial de óleo foi avaliado em outras pesquisas. Segundo Hosny [75] o aumento da concentração (500 - 2000 mg/l) melhora a porcentagem de remoção de óleo depois de 40 minutos, sendo: 55%, 65% e 70%

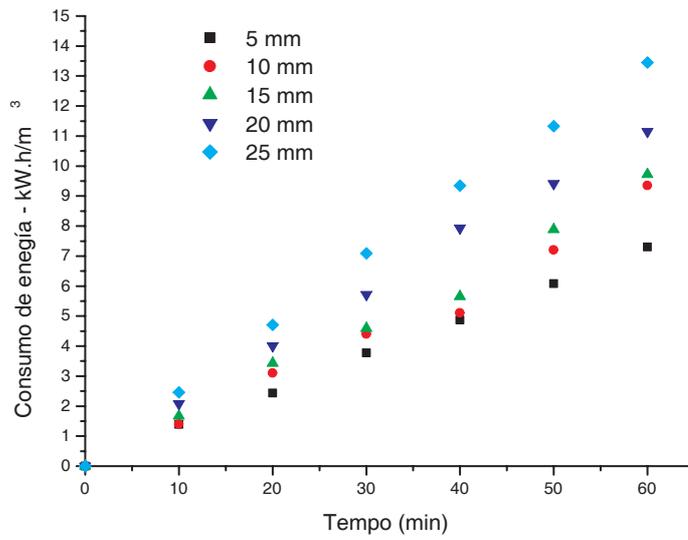


Figura 5.17: Distância entre os eletrodos versus consumo de energia ;[surfactante]=1g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de alumínio; 6 eletrodos ; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$

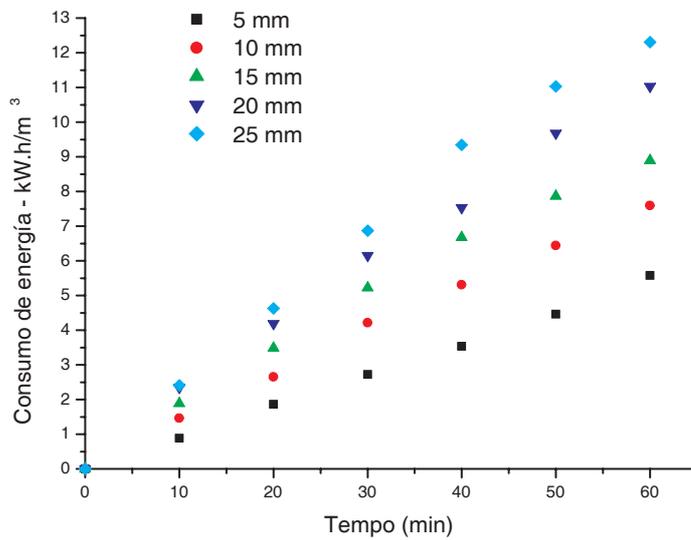


Figura 5.18: Distância entre os eletrodos versus consumo de energia ;[surfactante]=1g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]=1 g/l; Anodos de ferro; 6 eletrodos ; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$

Tabela 5.8: Resumo de experiências eletrodos de Al avaliando a Concentração inicial do óleo

Experimento	Número eletrodos	Concentração Inicial do óleo (g/l)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
11a	4	1,5	98,8	99,3
12a	4	3	99,6	99,3
13a	4	6	98,9	97,8
14a	4	9	99,9	99,1
15a	4	10	99,2	97,7
26a	6	1,5	99,6	98,9
27a	6	3	99,6	99,6
28a	6	6	99,7	98,4
29a	6	9	99,6	97,5
30a	6	10	99,8	97,9

para as concentrações iniciais de 490, 1050 e 1990 mg/l, respectivamente. Por outro lado, Cañizares et al.[3] observaram menores remoções da DQO quando trabalharam com maiores concentrações de óleo. Já no trabalho de Gutierrez mostrou-se que a remoção do óleo é independente da concentração inicial (na faixa de 0,5 até 10 g/l de óleo), ou seja, que o mecanismo de remoção deve ser independente da concentração do poluente [74].

Nos seguintes experimentos foram avaliados o efeito da concentração inicial de óleo na faixa de 1.5 - 10 g/l, com valores de densidade corrente constante de 9.4 mA/cm² e distanciamento dos eletrodos de 10 mm. Os resultados desses experimentos são apresentados a seguir.

5.4.1

Anodos de Alumínio

Na tabela 5.8, dados de redução da DQO são indicados depois de 60 minutos de operação, fazendo uso de eletrodos de alumínio. Como mostrado na figura 5.19, usando 4 eletrodos, observa-se que no decorrer da eletrocoagulação, a DQO diminui até atingir um valor mínimo (em torno de 98% de redução), o qual se torna constante depois de 30 minutos. O comportamento é similar para toda a faixa de concentração de óleo.

No caso do uso de três anodos de alumínio (ou 6 eletrodos na célula), o mesmo comportamento é notado, comparado com o uso de dois anodos. Sendo assim, a concentração inicial de óleo não afeta a redução da DQO, podendo ser vista na figura 5.20. Porém a cinética é favorecida neste caso, sendo necessários 20 minutos para conseguir uma redução máxima de (99%) da DQO .

Na redução da turbidez para o caso de 4 eletrodos, o efeito da concen-

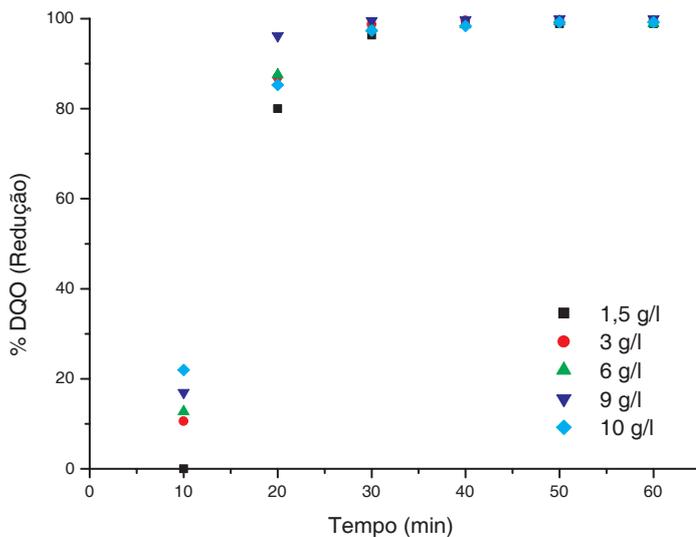


Figura 5.19: Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²;

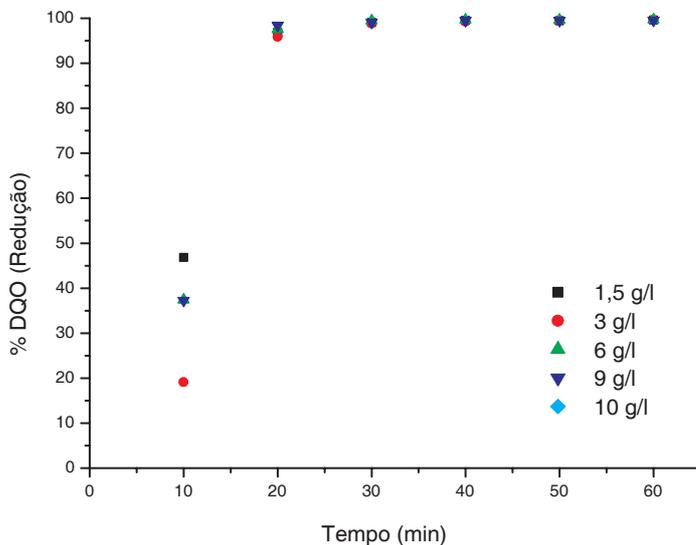


Figura 5.20: Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al, 6 eletrodos, $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm²

tração inicial do óleo é apresentado na figura 5.21 a qual mostra comportamentos similares para todas as curvas. Depois de 40 minutos de operação a turbidez aparece inalterável para toda a faixa estudada de concentração inicial de óleo.

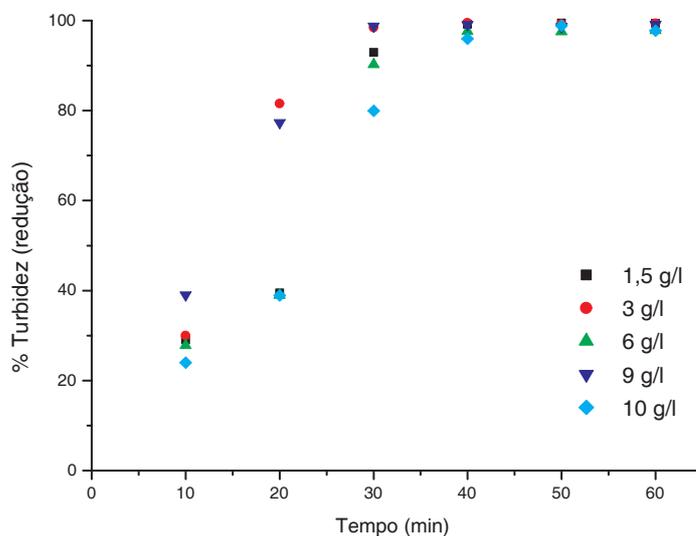


Figura 5.21: Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al; 4 eletrodos, $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm²

Na figura 5.22 é observado um comportamento similar a da figura 5.21 (para o caso de 4 eletrodos) na redução da turbidez. Portanto, não se encontrou nenhuma influência entre as concentrações de óleo e a eficiência da redução da turbidez, mas sim na cinética do processo.

5.4.2 Anodos de Fe

Na tabela 5.9, são apresentados os dados obtidos da DQO e turbidez para as diferentes concentrações iniciais de óleo em 60 minutos de operação usando eletrodos de ferro.

Na análise da figura 5.23, usando dois anodos de ferro, o comportamento das curvas de redução da DQO para toda a faixa de concentração de óleo estudada foram similares, indicando que este parâmetro não tem influência na remoção do óleo. Além disso, o tempo requerido para obter a máxima redução da DQO (em torno de 98%) foi de 40 minutos.

Para o uso de dois e três anodos de ferro, o comportamento é similar, sendo que a concentração inicial do óleo não influencia na redução DQO,

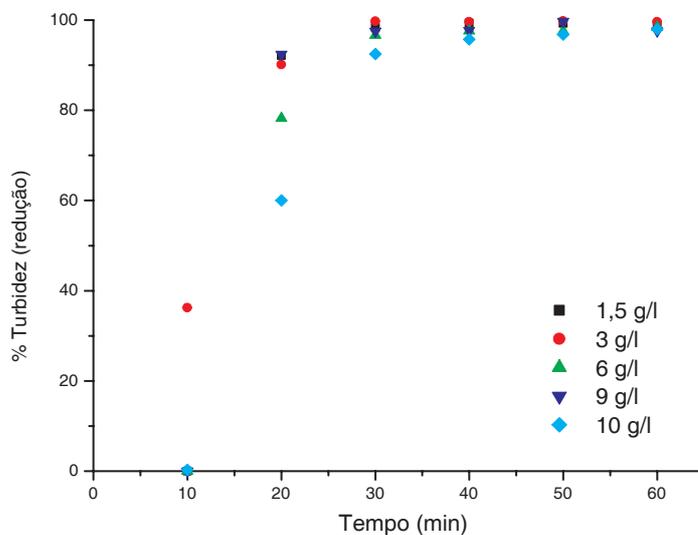


Figura 5.22: Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al; 6 eletrodos ; $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm²

Tabela 5.9: Resumo de experiências eletrodos de Fe avaliando a concentração inicial do óleo

Experimento	Número eletrodos	Concentração Inicial do óleo (g/l)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
11b	4	1,5	97,9	87,0
12b	4	3	99,1	97,7
13b	4	6	98,6	94,3
14b	4	9	99,03	88,7
55b	4	10	99,3	96,8
26b	6	1,5	99,1	93,4
27b	6	3	98,9	98,0
28b	6	6	99,7	99,2
29b	6	9	99,7	79,0
30b	6	10	99,1	98,6

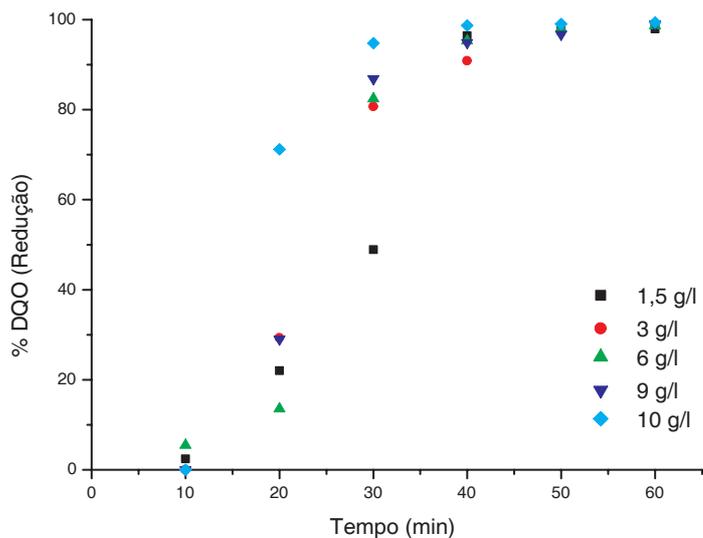


Figura 5.23: Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²

figura 5.24. Nota-se que nos primeiros 20 minutos consegue-se obter a máxima redução da DQO (98%) independentemente da concentração inicial de óleo.

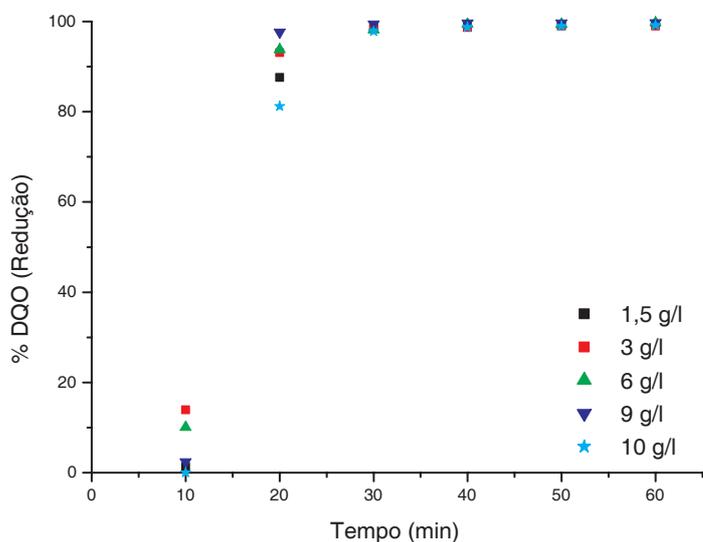


Figura 5.24: Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Ânodos de Fe; 6 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²

O aumento e diminuição na redução da turbidez (figura 5.25) usando

2 anodos de ferro como foi observado e avaliando nos parâmetros anteriores. Este comportamento é característico quando usa esse tipo de material como anodo. Ainda assim conseguem-se reduções em torno de 90% nos primeiros 20 minutos.

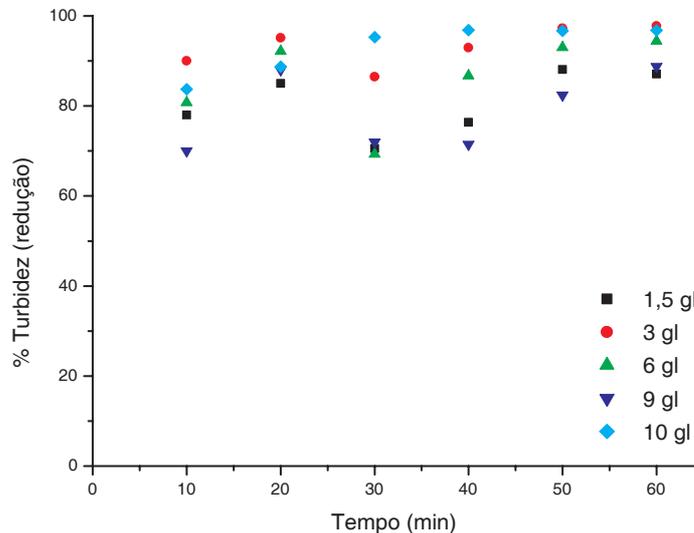


Figura 5.25: Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da Turbidez em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm² (Fe)

Na figura 5.26 é apresentado o efeito da concentração inicial do óleo na redução da turbidez, para 6 eletrodos. Nota-se que este parâmetro não influencia na eficiência de remoção. É apreciável também aumento e diminuição da turbidez, devido à presença de íons de ferro (de cor verde ou amarela) na solução. A maior eficiência de remoção foi conseguida aos 30 minutos, sendo em torno de 90%.

5.5

Efeito da densidade de corrente elétrica na mudança de pH

A importância do pH na redução da DQO e da turbidez já foi apreciada por Kobya et al. [30], na qual altas reduções da DQO foram conseguidas em meio ácido para ambos tipos de eletrodos (Al e Fe). Assim, para altas reduções da turbidez, o meio ácido é preferível para o alumínio, e meio neutro para o ferro. O aumento significativo do valor do pH é atribuído a geração dos íons OH⁻ durante a etapa de redução da água. Embora estes íons também sejam usados na formação do agente coagulante, a quantidade remanescente conduz ao aumento do valor do pH. Isto é observado em muitos trabalhos, tais como

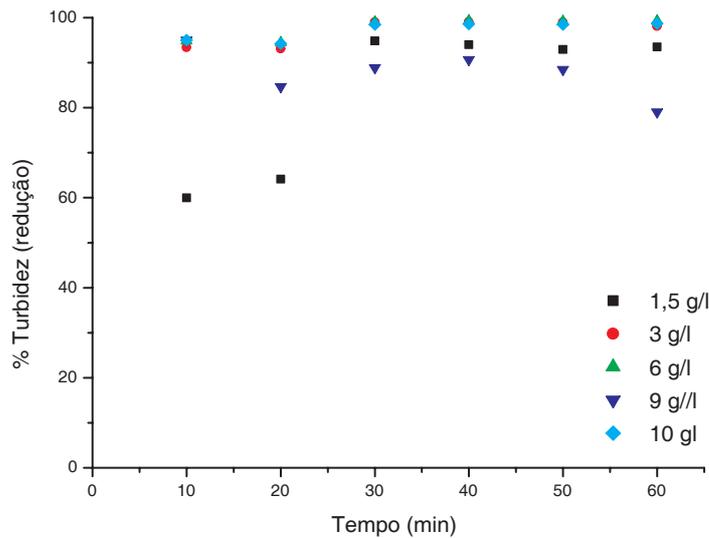


Figura 5.26: Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 6 eletrodos ; $d_e= 10$ mm; $\delta= 9,4$ mA/cm² (Fe)

Kobia et al. [30], Chen et al. [19], Angelis et al. [27]. As experiências foram feitas com um pH inicial em torno de 8-9 correspondente ao pH natural da emulsão.

5.5.1 Anodos de Alumínio

Na tabela 5.10, apresenta-se os dados obtidos do pH nas diferentes densidades de corrente testadas em 60 minutos de operação. O comportamento do pH versus diferentes densidades de corrente são apresentadas na figura 5.27. Nota-se um ligeiro aumento no pH (pH inicial na faixa de 8 - 8,5 e pH final 8,7 - 9,4). Isto quer dizer que a mudança de pH não é muito significativa.

Quando são usados três anodos de alumínio, é possível notar que há um maior aumento no pH que no caso de uso de dois, sendo o pH final 10,4 e 10 para as densidades de corrente 12,9 e 9,4 mA/cm² (figura 5.28) e em torno de 9,5 para as densidades de corrente 2,5; 4,3 e 6,4 mA/cm².

A resposta inversa do pH com o tempo (sucessivas mudanças) obtida é característica dos processos complexos; estas estranhas mudanças no pH foi explicado por Canizares et al. [3], na qual relacionam a ocorrência simultânea de reações químicas e eletroquímicas na célula, assim a redução catódica da água faz o pH aumentar, enquanto a formação das diferentes espécies de alumínio, como exemplo hidróxido de alumínio, faz o pH diminuir.

Tabela 5.10: Comportamento do pH para as diferentes densidades de corrente (eletrodos de Alumínio)

Experimento	Número eletrodos	Densidade de Corrente mA/cm ²	pH Inicial	pH Final
1a	4	2,5	8,3	9,2
2a	4	4,3	8,4	9,4
3a	4	6,4	8,0	9,2
4a	4	9,4	8,14	8,7
5a	4	12,9	8,5	8,7
16a	6	2,5	8,8	9,7
17a	6	4,3	8,4	9,7
18a	6	6,4	8,6	9,8
19a	6	9,4	8,3	10,4
20a	6	12,9	8,9	10,3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621760/CA

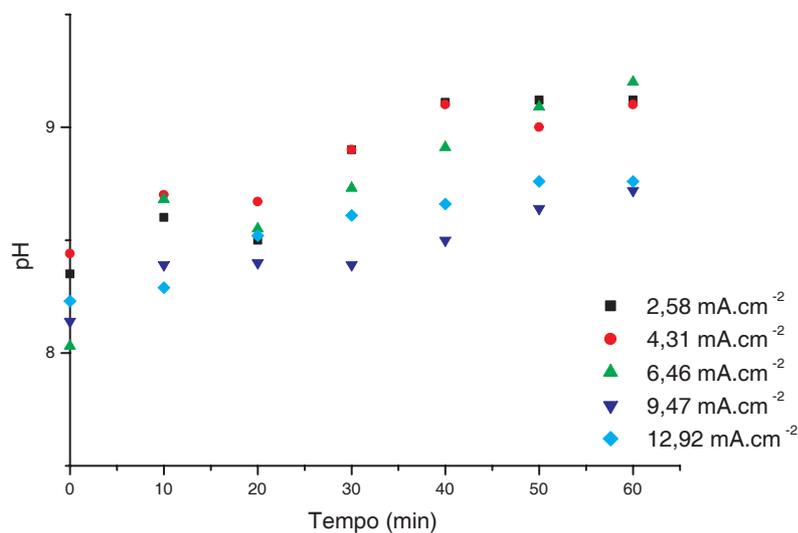


Figura 5.27: Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.

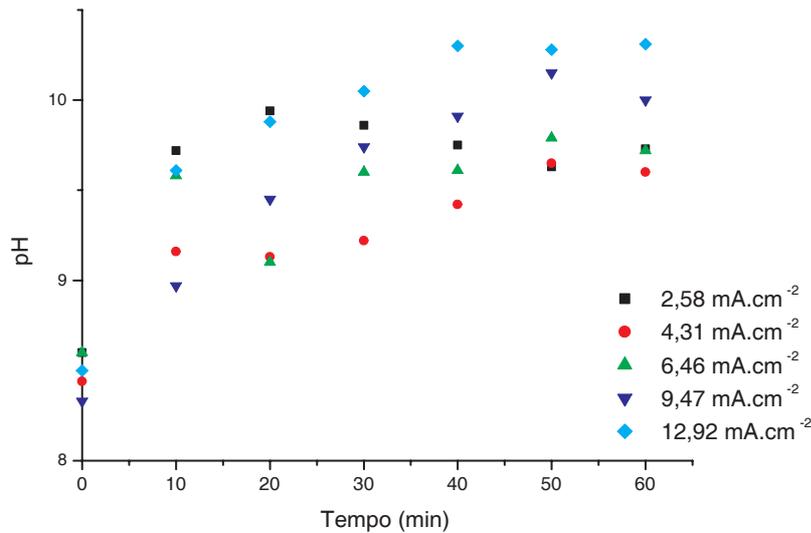


Figura 5.28: Comportamento de pH em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodo de Al; 6 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm².

5.5.2

Anodos de Ferro

Na tabela 5.11, apresenta os dados obtidos das mudanças do pH nas diferentes densidades de corrente testadas depois de 60 minutos de operação, usando eletrodos de ferro.

Apresenta-se na figura 5.29, a mudança do pH para o caso do uso de 2 anodos de ferro. Iniciando com um pH de 9 se obtém um pH final na faixa de 10,6 - 11,4.

Com o uso de mais um anodo de ferro, a mudança do pH é apresentado na figura 5.30, mostra um comportamento muito similar ao caso anterior, pois se tem um ligeiro aumento de pH, o qual iniciou-se em torno de 9,5 até próximo de 11.

Fazendo uma análise para os dois tipos de materiais de eletrodos usados, com respeito à mudança de pH, pode-se dizer que no caso de alumínio, a mudança é menor comparada à de ferro. No primeiro caso, a mudança é somente de 1 ponto de pH e 2 pontos de pH para o caso de ferro.

Ao se comparar os resultados obtidos com os da literatura, nota-se que eles se comportam de maneira prevista, pois, conforme já citado na revisão bibliográfica, para eletrodo de alumínio, sempre há um aumento do pH final em relação ao inicial. Já para o ferro, a mudança de pH é ligeiramente maior quando usado anodos de alumínio.

A pequena mudança no pH no processo de eletrocoagulação é benéfico

Tabela 5.11: Comportamento do pH para as diferentes densidades de corrente usando anodos de ferro

Experimento	Número eletrodos	Densidade de Corrente mA/cm ²	pH	
			Inicial	Final
1b	4	2,5	8,7	11,1
2b	4	4,3	9,1	11,3
3b	4	6,4	9,1	10,6
4b	4	9,4	9,1	11,0
5b	4	12,9	9,1	11,1
16b	6	2,5	9,2	10,7
17b	6	4,3	9,3	10,7
18b	6	6,4	9,4	10,9
19b	6	9,4	9,5	10,7
20b	6	12,9	9,6	11,1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621760/CA

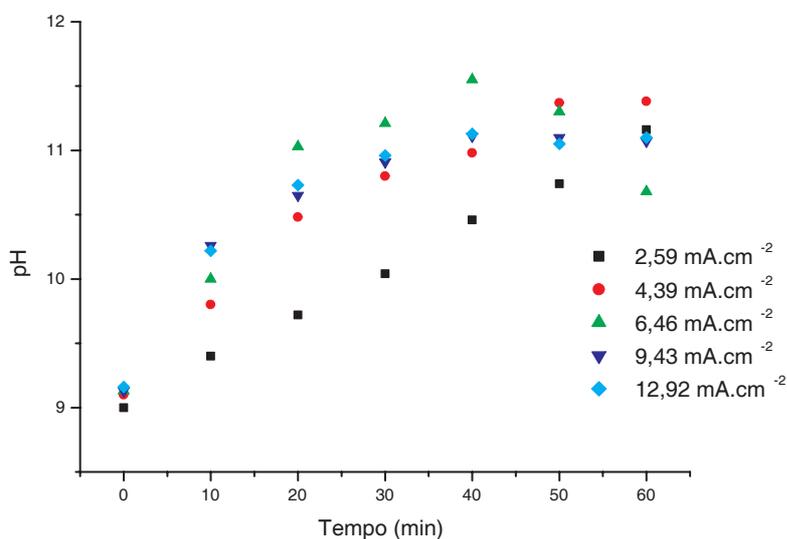


Figura 5.29: Comportamento de pH em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodo de Ferro; 4 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²

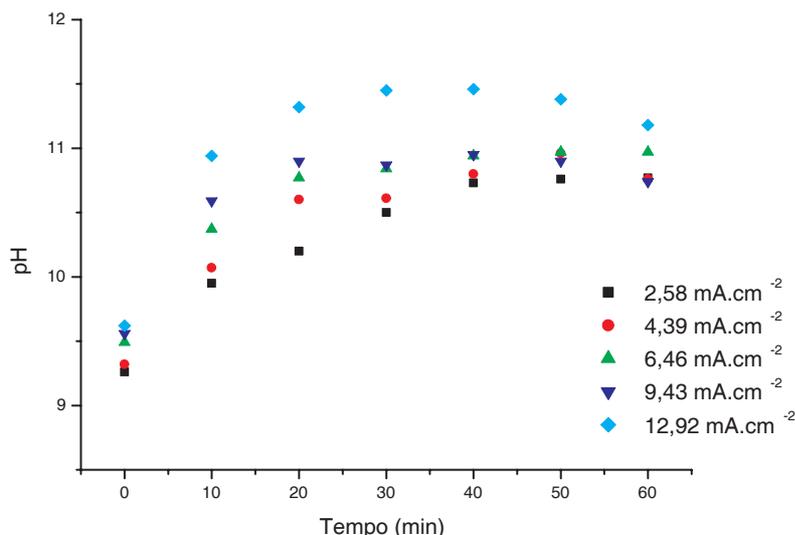


Figura 5.30: Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Ferro; 6 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²

no tratamento de efluentes, já que não precisa de reagentes adicionais para controlar este parâmetro.

5.6

Efeito da relação Área-Volume, SA/V

Segundo Bastos [79], o aumento da área superficial do eletrodo promove uma diminuição da resistência ôhmica entre solução e eletrodo. Portanto o ideal é trabalhar com as maiores áreas superficiais de eletrodos, pois pode-se trabalhar com menores potenciais para obter a corrente desejada, já que a resistência total será menor levando a um menor gasto de energia.

Pode-se dizer que um aumento na quantidade de eletrodos presentes no sistema (maior SA/V) produzirá uma melhora na redução da DQO e turbidez, pois é esperada maior quantidade de alumínio ou ferro dissolvido, além disso, tem-se maior geração de bolhas de oxigênio e hidrogênio, os quais favorecem a remoção da carga orgânica.

5.6.1

Anodos de Alumínio

Na tabela 5.12, são apresentados os resultados obtidos mudando a quantidade dos eletrodos na célula eletrolítica.

Na tabela 5.13, apresenta-se a quantidade de metal dissolvido nas distintas relações de SA/V testadas. O consumo de alumínio aumenta em 67%

Tabela 5.12: Resumo de experiências com eletrodos de Al, avaliando a relação SA/V para 60 minutos de operação

Experimento	Número eletrodos	SA/V (m^2/m^3)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
31a	2	6,1	1,26	30,8
11a	4	18,2	98,62	97,81
22a	6	30,4	99,62	98,94

Tabela 5.13: Alumínio dissolvido em 30 minutos de operação comparado com a relação SA/V.

Números eletrodos	SA/V (m^2/m^3)	Amperagem (A)	Al Dissolvido
2	6,1	1,46	0,24
4	18,2	4,4	0,73
6	30,4	7,3	1,22

Tabela 5.14: Resumo de experiências com eletrodos de Fe avaliando a Relação SA/V em 60 minutos de operação

Experimento	Número de eletrodos	SA/V (m^2/m^3)	%Redução DQO	%Redução Turbidez
31b	2	6,1	0,09	15,8
11b	4	18,2	97,9	87,0
22b	6	30,4	99,1	93,4

quando se utiliza 6 eletrodos, comparado com 4 eletrodos.

Na figura 5.31, pode-se ver a influência da relação SA/V na redução da DQO, utilizando dois eletrodos ($6 \text{ m}^2/\text{m}^3$), onde a redução é menor que 1,3%. Para o uso de 4 eletrodos ($18,2 \text{ m}^2/\text{m}^3$) alcança-se uma redução superior a 95% em 30 minutos de operação. Finalmente para 6 eletrodos ($30,35 \text{ m}^2/\text{m}^3$) no sistema, consegue-se alcançar remoções acima de 90% somente em 20 minutos de operação.

5.6.2 Anodos de Ferro

A tabela 5.14 é feita com os resultados obtidos das remoções, mudando a quantidade de eletrodos no sistema.

Fazendo uma análise na tabela 5.15 pode-se dizer que, o uso de 6 eletrodos leva a uma maior dissolução de material, sendo em torno de 70% comparado

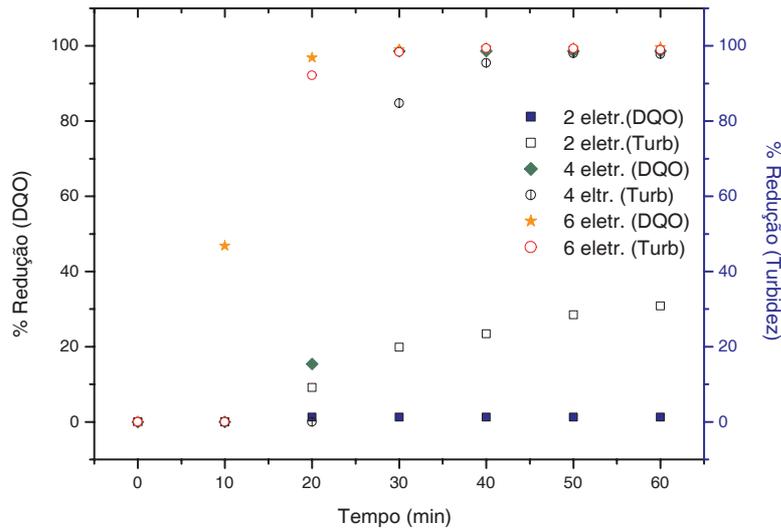


Figura 5.31: Efeito da relação SA/V na eficiência de redução da DQO e turbidez em função do tempo: [surfactante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²; Anodos de Al

Tabela 5.15: Ferro dissolvido para as distintas relações de SA/V testadas

Número de eletrodos	SA/V (m ² /m ³)	Amperagem (A)	Fe Dissolvido
2	6,1	1,46	0,76
4	18,2	4,4	2,29
6	30,4	7,3	3,91

com o uso de 4 eletrodos.

Para o caso do uso de anodos de ferro o efeito da relação SA/V é indicado na figura 5.32, pode-se notar que para o caso de 2 eletrodos não se tem redução significativa da DQO em 60 minutos de operação. Para o caso de 4 eletrodos na célula tem se a máxima redução em 40 minutos de operação. E finalmente com 6 eletrodos no sistema obtém-se a máxima redução (95%) em 30 minutos.

É notado que o efeito deste parâmetro é maior na redução da DQO que na turbidez. Assim, obtém-se reduções da turbidez de 15% e 30% para ferro e alumínio, inclusive com o uso de 2 eletrodos no sistema e nenhuma redução da DQO.

Logo, pode-se concluir que, baseado nos resultados apresentados nas figura 5.31 e 5.32, o aumento do numero de eletrodos gera um aumento da concentração de alumínio ou ferro no sistema, conseqüentemente favorecendo a remoção de óleo e cinética do processo.

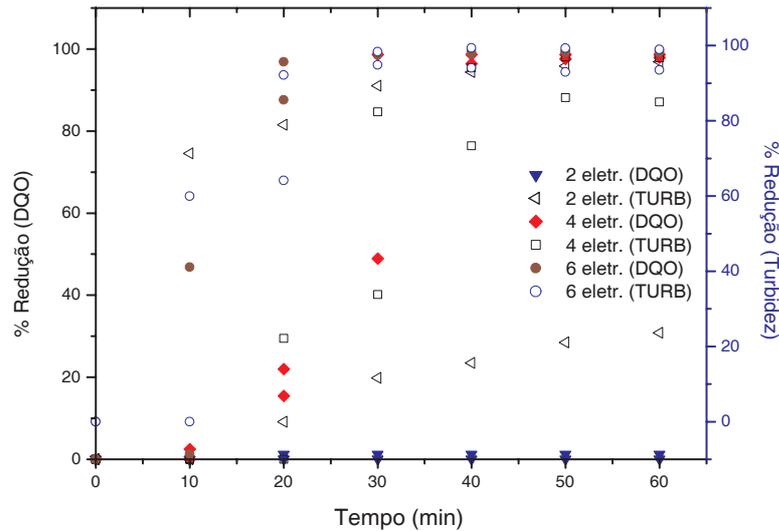


Figura 5.32: Efeito da Relação SA/V na eficiência de redução da DQO e turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²; Anodos de ferro

5.7

Consumo de Eletrodos

A heterogeneidade da emulsão e a formação de duas fases depois da desestabilização, não permitem uma medição exata do total de metal dissolvido na célula para cada uma das experiências.

Pablo Cañizares et al. [3] fizeram experiências mostrando que a dissolução do alumínio não é afetada com o conteúdo de óleo na solução, e medições mais exatas podem ser feitas mantendo as mesmas condições de operação (NaCl, pH), mas sem a presença de óleo.

Neste trabalho fez-se medições nestas condições (sem a presença de óleo) e o valor de metal dissolvido foi obtido pela diferença de peso dos anodos para cada tempo.

5.7.1

Consumo Teórico

O consumo dos eletrodos foi calculado trabalhando com 7,3 A de corrente e um tempo de 30 minutos. É preciso especificar que a massa molar do alumínio é de 27 g/mol, com número de oxidação 3. A massa molar do ferro é 56 g/mol, com número de oxidação 2. Fazendo uso da equação 3-42 para o cálculo do consumo teórico dos eletrodos temos:

Tabela 5.16: Dissolução teórica dos anodos até 30 minutos de operação

Tempo	Anodos	
	Al	Fe
10	0,41	1,27
20	0,82	2,54
30	1,22	3,81

1. Para o Anodo de Alumínio:

$$m_{el} = \frac{I.t.M}{F.z} = \frac{7,3.1800.27}{96500.3} = 1,22g \quad (5-1)$$

2. Para o Anodo de Ferro:

$$m_{el} = \frac{I.t.M}{F.z} = \frac{7,3.1800.56}{96500.2} = 3,81g \quad (5-2)$$

A diferença entre estes valores refere-se às características distintas do ferro e do alumínio, como a massa molar e a valência de cada elemento.

5.7.2 Consumo Experimental

A dissolução experimental dos anodos para cada tipo de material, foi obtida por diferença de pesos em cada tempo de operação, os resultados foram:

1. Anodos de Alumínio

Na tabela 5.17, apresenta os dados obtidos do alumínio experimentalmente com uma densidade de corrente de 9,4 mA/cm² e distância de eletrodo de 10 mm, o total de alumínio dissolvido foi de 1,41 gramas em 30 minutos, o suficiente para conseguir a redução da DQO e turbidez a valores superiores de 90%.

2. Anodos de Ferro

No caso do uso de anodos de ferro as quantidades dissolvidas são apresentadas na tabela 5.18. Para 30 minutos de operação o total de ferro dissolvido foi de 3,78 gramas.

Tabela 5.17: Alumínio dissolvido, medido experimentalmente, até 30 minutos de operação

Tempo	Anodos			Total (mg)
	1	2	3	
10	88,2	205,6	192,4	486,2
20	191,3	371,7	401	964
30	276,2	538	594,1	1408,3

Tabela 5.18: Ferro dissolvido até 30 minutos de operação para o uso de três anodos; $9,4 \text{ mA/cm}^2$, $d_e = 10 \text{ mm}$.

Tempo	Anodos			Total (mg)
	1	2	3	
10	277,3	448,3	543,9	1269,5
20	577,2	906,4	1053,2	2536,8
30	797,6	1600,1	1382,4	3780,1

Na figura 5.33, mostra-se o consumo de material no processo da eletrocoagulação. Note-se que para o caso do ferro ambos os valores reais e teóricos são similares, e a eficiência foi de 99,2%. Já no caso do alumínio tem-se uma maior dissolução, comparado com o valor teórico, pois a eficiência alcançou 115,6%. Este valor de dissolução concorda da dissolução super farádica do alumínio (maior que 100% de eficiência) descrita por Gutierrez [74].

Uma idéia prática do consumo de eletrodo é obtida ao dividir o valor encontrado do consumo de eletrodo pelo volume de efluente tratado.

Para Anodo de alumínio:

$$1,41 \text{ gramas}/0,0051 \text{ m}^3 = 276,47 \text{ mg/l.}$$

Para Anodo de ferro:

$$3,78 \text{ gramas}/0,0051 \text{ m}^3 = 741,17 \text{ mg/l}$$

Cada 1 litro de efluente tratado nas condições experimentais de cálculo consumiu 276,47 mg de eletrodo do alumínio ou 741,17 mg do eletrodo do ferro.

Deve-se lembrar que grande parte de alumínio e ferro dissolvido no anodo, será utilizada para a produção do coagulante, e o restante permanecerá na solução como uma quantidade residual. Nesta dissertação não houve o

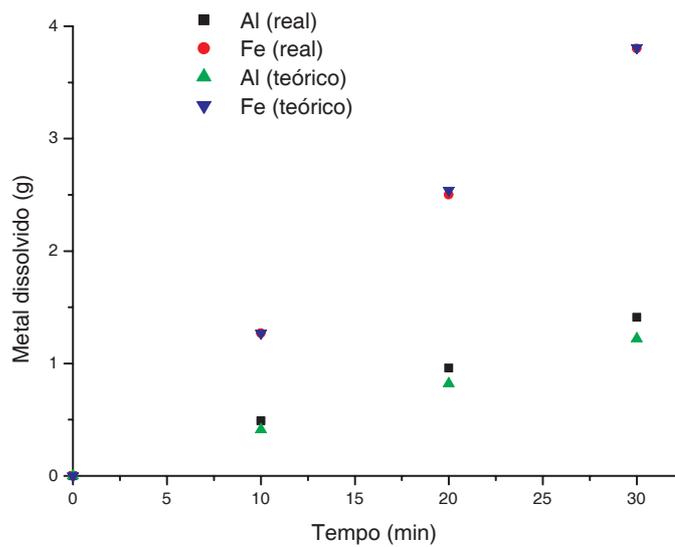


Figura 5.33: Consumo do material de anodo

acompanhamento da quantidade destes metais na solução. Não há como afirmar ou estimar a quantidade final de alumínio e ferro em cada solução.

5.8 Geração de borra

Junto ao tratamento dos efluentes tem-se a geração de borras. Aproximadamente os dois terços ($2/3$) da borra gerada vai para o topo da célula e pode ser removida, enquanto que um terço ($1/3$) é gerada depois da sedimentação. Os componentes das borras incluem sólidos suspensos, óleos e graxas, assim como, os hidróxidos de alumínio/ferro gerados [19].

Koby et al [72] fizeram uma avaliação técnica-econômica da eletrocoagulação. Os resultados mostraram que a quantidade de borra foi em torno de $0.65 - 1 \text{ Kg/m}^3$ no caso do ferro e $0.9 - 1.3 \text{ kg/m}^3$ no caso de alumínio. Segundo o mesmo autor, em geral mais borra é produzida em sistemas bipolares em serie que em sistemas monopolar em paralelo. No trabalho de Chen et al [19] a quantidade de borra foi de 0.108 kg/m^3 , após de ser secada por 10 horas a 105°C e após, 550°C por 1 hora. A borra gerada em nossas experiências foi secada por 48 horas em uma temperatura de 105°C , e obteve os seguintes pesos: $2,23 \text{ Kg/m}^3$ e $2,76 \text{ Kg/m}^3$ para alumínio e ferro, respectivamente.

Nas figuras 5.34 e 5.35, são mostradas as borras geradas no processo da eletrocoagulação usando os diferentes tipos de materiais de anodo. Nas figuras ?? e ?? apresentam-se as borras secas depois de 48 h na temperatura

de 105 °C. Pode-se notar a diferença de cor entre ambas borras, devido à cor dos hidróxidos de alumínio e de ferro presentes.



Figura 5.34: Borra com anodos de alumínio.

5.9

Melhores parâmetros

Neste trabalho consideram-se como melhores parâmetros: densidade de corrente 9,4 mA/cm²; distância dos eletrodos 10 mm; concentração inicial de óleo 1,5 g/l e 6 eletrodos no sistema. Assim, sob estas condições foram comparados ambos os tipos de materiais.

5.9.1

Anodos de Alumínio

Na tabela 5.19, apresentam-se os dados obtidos trabalhados com as melhores condições de operação.

Analisando a figura 5.36, pode-se dizer que operando nestas condições é possível obter uma boa redução, já nos primeiros 20 minutos sendo 96,8% da



Figura 5.35: Borra com anodos de Ferro.

Tabela 5.19: Experiência com os melhores parâmetros, usando anodos de A; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$; $d_e = 10$; 60 min.

Tempo	pH final	%Redução DQO	%Redução Turbidez
0	8,25	0	0
10	8,12	46,82	92,1
20	8,43	96,8	92,1
30	8,38	99,0	98,3
40	9,91	99,5	99,3
50	10,15	99,4	99,2
60	10,47	99,6	98,9

DQO e 92,15% da turbidez, podendo alcançar valores na ordem de 99,03 % e 98,37% na DQO e turbidez em 30 minutos respectivamente. O pH final foi de 8,43, sendo a mudança muito pequena comparada ao pH inicial de 8,25. O consumo de energia registrado foi de 3,72 kWh/m³ em 30 minutos, a tensão inserida foi de 5,2 V.

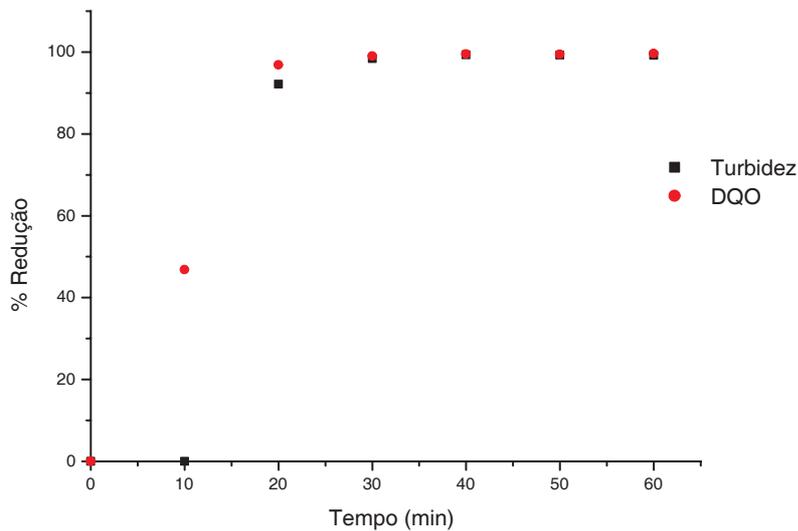


Figura 5.36: Melhores parâmetros na redução de DQO e turbidez: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm²; 3 anodos de Al.

5.9.2 Anodos de Ferro

Os dados mostrados na tabela 5.20, apresentam a remoção conseguida com as melhores condições de operações.

Na figura 5.36 pode-se ver a remoção conseguida trabalhando com anodos de ferro e sob os melhores parâmetros de operação; as máximas eficiências de redução são obtidas já nos primeiros 30 minutos, sendo: 94,86% e 98,49% para DQO e turbidez, respectivamente; o pH final foi de 11,5 mostrando um aumento em comparação ao pH inicial de 9,55; o consumo de energia foi de 4,15 kWh/m³, com uma tensão de corrente de 5,8 V e uma corrente de 7,3 A. Além disso, deve-se ressaltar a ligeira coloração amarela do efluente final devido à presença do hidróxido de ferro(III).

No caso dos anodos de ferro pode ser esperado que os compostos que reagem com ambas espécies Fe(II) e Fe (III) para formar compostos insolúveis serão completamente removidos, a quantidade de DQO não removida será a

Tabela 5.20: Experiência com os melhores parâmetros, usando anodos de Fe, e 6 eletrodos; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$; $d_e = 10$; 60 min.

Tempo	pH final	%Redução DQO	%Redução Turbidez
0	9,55	0	0
10	10,6	59,9	1,2
20	11,0	64,1	87,5
30	11,5	94,86	98,49
40	11,48	94	98,8
50	11,4	92,9	99,1
60	11,17	93,4	99,1

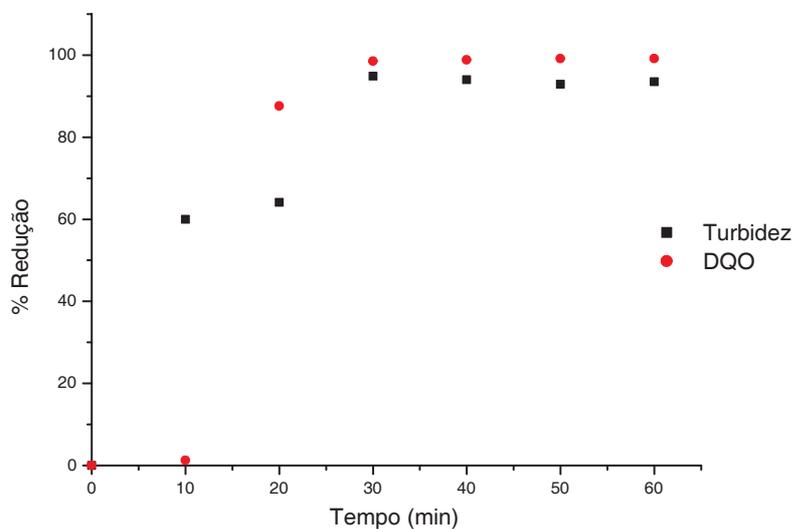


Figura 5.37: Melhores Parâmetros na Remoção de DQO e turbidez: [surfactante]= 1 g/l; [NaCl]=1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; $d_e = 10 \text{ mm}$; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$; 3 anodos de Fe.

parte solúvel que não reage com o Fe(II) e Fe(III) para formar compostos insolúveis.

No caso dos anodos de alumínio :

1. O Alumínio tem apenas um estado de oxidação, (Al^{3+}) assim quando um componente orgânico reage com este para formar um componente insolúvel, este reagirá quase completamente.
2. A solubilidade do Hidróxido de Alumínio, ($\text{Al}(\text{OH})_3$) apresenta um mínimo a pH menor que 4.
3. Usando eletrodos de Al tem-se produção de oxigênio (O_2) no catodo, o qual pode contribuir para a demanda de oxigênio.

Cada componente que contribui na DQO nas águas residuais é diferente, e também cada água residual é distinta, logo é aconselhável testar ambos eletrodos (Fe e Al), além a combinação de sistemas para obter melhores resultados.[3]. Na Figura 5.38, mostra-se o efluente filtrado depois de 30 minutos de operação sob os parâmetros anteriormente mencionados. Obteve-se uma turbidez final de 2,77 NTU e 2,39 NTU (em torno de 99% da redução) para o caso de anodos de ferro e alumínio.



Figura 5.38: Efluente filtrado depois do tratamento (Al e Fe).

O consumo da energia para cada tipo de material de anodo usado sob os melhores parâmetros de operação é mostrado na figura 5.39, na qual pode-se

observar que o ferro apresenta um consumo ligeiramente superior ao alumínio, como já foi comentado anteriormente.

Observa-se pela figura 5.39 que a voltagem diminuiu com o tempo até encontrar um valor constante devido ao incremento da força iônica. Concordando com os trabalhos de Chen-Lu [2] e Cañizares [3].

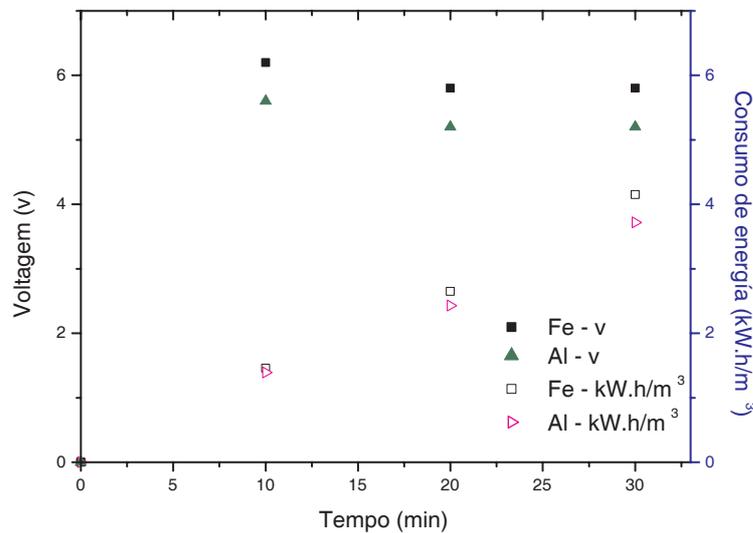


Figura 5.39: Consumo de Energia e voltagem versus Tempo sob os melhores parâmetros.

5.10

Efeito da geometria dos eletrodos

Testes foram realizados avaliando a geometria dos eletrodos só para o caso de anodos alumínio perfurados e os não perfurados. Obteveram-se os seguintes resultados: tabela 5.21 e figura 5.40.

Na tabela 5.21, apresenta-se os dados obtidos avaliando a geometria dos eletrodos. Na figura 5.40 apresenta-se o efeito da geometria dos eletrodos: mostra-se que com o uso dos eletrodos perfurados alcança-se mais rapidamente a redução em 20 minutos, sendo 96,84% da DQO e 92,15% da turbidez. Para os eletrodos não perfurados o tempo mínimo necessário para alcançar a máxima redução foi de 30 minutos permitindo remoções da ordem de 94,04% e 95,77% para a DQO e turbidez, respectivamente. Isto mostra que a cinética da remoção é favorecida pela presença dos orifícios, o qual permite uma maior movimentação dos íons, favorece a liberação das bolhas, garantindo a desestabilização da emulsão em tempos mais curtos.

Tabela 5.21: avaliação da geometria dos eletrodos, com e sem orifícios, usando anodos de Al, 6 eletrodos, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$, $d_e = 10$; 60 min.

Tempo	Não perfurados		Perfurados	
	%Redução		%Redução	
	DQO	Turbidez	DQO	Turbidez
0	0	0	0	0
10	5,03	30,6	46,8	0
20	37,7	44,5	96,8	92,15
30	94,04	95,77	99,0	98,37
40	97,9	98,4	99,5	99,3
50	98,2	99,3	99,4	99,2
60	98,9	99,4	99,6	98,9

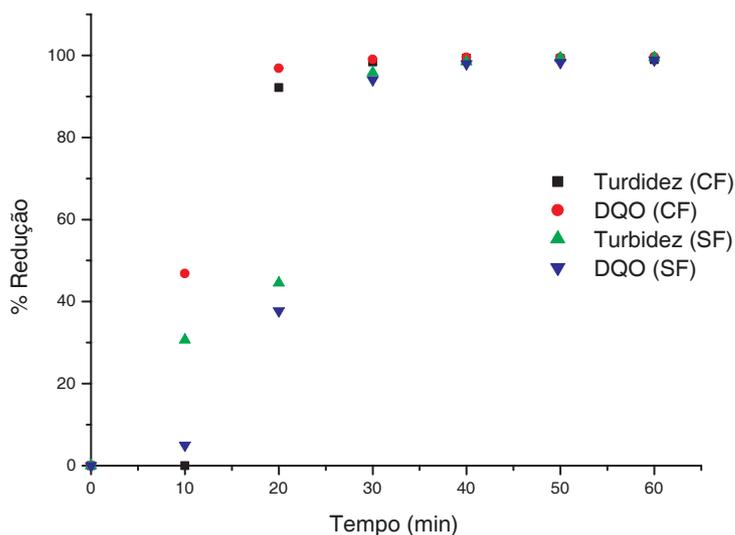


Figura 5.40: Efeito da geometria dos eletrodos, [surfatante]= 1 g/l, [NaCl]=1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, $d_e= 10 \text{ mm}$, $\delta= 9,4 \text{ mA/cm}^2$, CF= eletrodos perfurados, SF= Não perfurados.

5.11

Custo de operação

Segundo Kobya et al. [30], citado por Henn. [49] o custo de operação inclui: material, principalmente do eletrodo, custo da energia elétrica, do trabalho, da manutenção, da desidratação do lodo e disposição, além dos custos fixos.

No trabalho de Asselin et al. [76] avaliou-se o processo de eletrocoagulação economicamente, incorporando só os custos de reagentes químicos, eletrodos, consumo de energia e disposição de lodos.

Entretanto, conforme Donini et al. [66] citado por Kobya et al. [30], os custos de energia e do material do eletrodo representam cerca de 80% dos custos de operação. Portanto, serão considerados apenas estes dois fatores como é mostrado na equação abaixo:

$$C_{op} = a.C_{energ} + b.C_{eletrodo} \quad (5-3)$$

sendo:

- C_{op} = custo de operação, R\$/m³.
- a = custo de energia, R\$/kWh.
- C_{energ} = consumo de energia, kWh/m³_{efluente}.
- b = custo mássico da placa, R\$/kg_{eletrodo}.
- $C_{eletrodo}$ = consumo do eletrodo, kg/m³_{efluente}.

Foi realizada uma cotação do custo da energia com a light para a cidade de Rio de Janeiro no mês de junho de 2008, e o valor obtido para indústria e comércio foi de R\$ 0,47333/kWh.

Também, foi feito uma cotação do custo do material do eletrodo com algumas empresas para chapas de alumínio / ferro de 3m*1m *1mm . O valor médio encontrado foi de R\$ 156,8 para o alumínio, já para o ferro custou em média R\$ 83 .

De acordo com a equação 5-3, pode-se calcular o custo de operação no reator em batelada, para ambos tipos de anodos. Neste trabalho consideram-se somente os custos com o desgaste do eletrodo e o consumo de energia, que representam 80% do valor total. Deve-se ressaltar que este sistema não está otimizado. Logo, o custo se apresentará diferente ao valor obtido após modificações e otimizações.

$$C_{op} = a.C_{energ} + b.C_{eletrodo}$$

sendo:

- a = custo de energia, 0,47333 R\$/kWh.
 C_{energ} = consumo de energia, 3,72 (Al) e 4,15 (Fe) kWh/m³_{efluente}.
 b = custo mássico da placa, 19,3 R\$/kg_{Al} e 4,1 R\$/kg_{Fe}
 $C_{eletrodo}$ = consumo do eletrodo, kg/m³_{eletrodo} .

Para eletrodo de Alumínio

$$C_{op} = 0,47333 \cdot 3,72 + 19,3 \cdot 1,41 / (1000 \cdot 0,0051)$$

$$\text{Custo de Operação} = 7,1 \text{ R}/\text{m}^3.$$

Para eletrodo de ferro

$$C_{op} = 0,47333 \cdot 4,15 + 4,1 \cdot 3,78 / (1000 \cdot 0,0051)$$

$$\text{Custo de Operação} = 5 \text{ R}/\text{m}^3.$$

Os resultados obtidos foram feitos trabalhando sob as condições de: 7,3 mA/cm², 30 minutos de operação, e 6 eletrodos no sistema.