Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07444

TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS DE ABATE DE AVES POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO: RELAÇÃO AR/SÓLIDOS, TAXA DE RECIRCULAÇÃO E SELEÇÃO DE POLÍMEROS CONDICIONANTES

Halice Jerônimo de Araújo Silva
Mayra Angelina Quaresma Freire, Maria Clara Quaresma Freire, André Victor Freire da Silva, André Farias da Silva.
UFPE

Objetivo e síntese do estudo

O Contexto:

- Brasil: Maior exportador mundial de frango.
- Consequência: Intensa geração de efluentes.

A Problemática:

- Alta carga orgânica.
- Elevadas concentrações de Óleos e Graxas (OG), Sólidos Suspensos (SST), Proteínas e coloides.

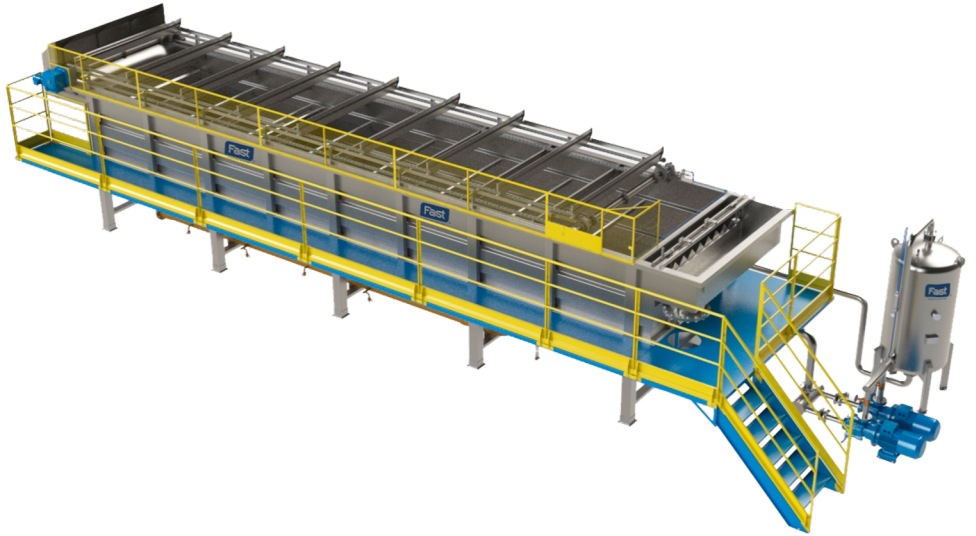
O Objetivo:

- Avaliar a FAD no tratamento avícola.
- Foco: Otimizar a relação Ar/Sólidos (A/S), recirculação e polímeros.

Flotação por ar dissolvido

- **Microbolhas (10 a 100 µm):** Geradas por despressurização.
- **O Princípio Físico:** Floco + Bolha = Menor densidade aparente.
- **O Resultado:** Ascensão e remoção mecânica na superfície.

Figura 1 – Flotador por ar dissolvido



Fonte: Fast Tecnologia Industrial (2026).

Metodologia - Fundamentos de Dimensionamento (Relação A/S)

Importância: Relações A/S insuficientes não flotam os sólidos; relações excessivas causam desperdício de energia e rompem os flocos.
Equações de Dantas (UFRN): A taxa de recirculação (R) é diretamente proporcional à relação A/S desejada e à concentração de SST.

- Equação 1: $A/S = 1{,}3 \times Sa \times (f \times P - 1) \times R / SST$

  Em que:

  A/S = relação ar/sólidos (mL/mg ou L/g);

  1,3 = constante que converte a solubilidade do ar de mL/L para unidades adequadas (incorpora a massa específica do ar a 20 °C);

  Sa = solubilidade do ar na temperatura de operação à pressão atmosférica (mL/L); a 20 °C: Sa = 18,7 mL/L; a 25 °C: Sa = 17,0 mL/L;

- Equação 2: $R = (A/S \times SST) / [1{,}3 \times Sa \times (f \times P - 1)]$

  Em que T é a temperatura em °C. Para T = 30 °C, Sa = 14,2 mL/L (redução de 24% em relação a 20 °C); para T = 40 °C, Sa = 10,8 mL/L (redução de 42%). E

Metodologia - Tabela Prática de Dimensionamento

Tabela 3 - Relação entre A/S, taxa de recirculação (R), pressão de saturação e concentração de SST afluente para sistemas FAD com recirculação parcial, a 20 °C e f = 0,5.

Relação A/S	Taxa de recirculação R (%)	P (kPa)	Cs (mg/L) a 20 °C	SST afluente (mg/L)	Observação
0,005	10–15	200–300	18,7	200–500	Pré-tratamento simples
0,010	15–25	300–400	18,7	500–1.000	Efluente bruto com baixa OG
0,015	25–35	350–450	18,7	1.000–2.000	Efluente avícola típico
0,020	35–50	400–500	18,7	2.000–3.500	Sangria/escalda — alta carga
0,025	50–70	450–550	18,7	3.500–6.000	Efluentecomposto alta carga
0,030	70–100	500–600	18,7	> 6.000	Casos extremos — requer pré-espessamento

Fonte: Adaptado de Dantas (2001) e Di Bernardo; Dantas (2005).

Metodologia - Estudo de Caso e Ensaios

Local de Estudo: Frigorífico avícola em Pernambuco (capacidade: 180.000 aves/dia). Vazão aproximada de efluente: 4.680 m³/dia.

Coleta: 9 amostras compostas coletadas após o gradeamento, em três campanhas (março, maio, julho de 2025).

Ensaios de Laboratório:

- *Jar Test:* Seleção do coagulante inorgânico ($FeCl_3$, PAC, $Al_2(SO_4)_3$) e do polímero auxiliar de floculação.
- *Flotatest:* Determinação da relação A/S ótima simulando flotador com recirculação parcial (pressões de 300 a 600 kPa e recirculação de 15% a 100%).

Figura 2 – Efluente do frigorífico bruto



Fonte: Autor (2026).

Jar Test - Coagulante

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de Jar Test para seleção do coagulante primário. Critério: potencial zeta entre −5 e +5 mV.

Coagulante	Dosagem (mg/L)	pH ajustado	Zeta (mV)	Turbidez floculado (uT)	Observação
$FeCl_3$	50	7,0	−18	185	Flocos pequenos — insuficiente
$FeCl_3$	75	6,8	−6	98	Boa coagulação
$FeCl_3$	100	6,5	−2	54	Ótimo — SELECIONADO
$FeCl_3$	150	6,2	+4	61	Leve restabilização
PAC	80	7,2	−8	82	Alternativa viável
$Al_2(SO_4)_3$	120	7,0	−10	112	Desempenho inferior

Fonte: Autor (2026).

- Comparação de $FeCl_3$, PAC e sulfato de alumínio.
- Ajuste de pH e avaliação de turbidez e potencial zeta.
- Critério de coagulação: zeta próximo de zero (−5 a +5 mV).

Jar Test - Polímero Auxiliar

Tabela 8 - Resultados da seleção de polímero auxiliar de floculação para o efluente avícola pré-coagulado com $FeCl_3$ (100 mg/L, pH 6,5). cat. = catiônico; an. = aniônico; MM = massa molar.

Polímero (tipo / MM)	Dose (mg/L)	Floco (mm)	Turbidez (uT)	OG residual (mg/L)	Selecionado?
CPAM 30% cat. / 10×10^6 Da	5	1,8–2,5	48	210	Não
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	5	3,2–4,8	18	85	Não — subdose
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	8	4,5–6,0	12	52	SIM — ótimo
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	12	4,0–5,5	15	68	Não — excesso
CPAM 50% cat. / 18×10^6 Da	5	2,8–4,0	22	110	Não
APAM 30% an. / 15×10^6 Da	8	1,2–2,0	62	280	Não
Quitosana / $0,8\times10^6$ Da	30	1,5–2,2	55	245	Não

Fonte: Autor (2026).

- Sete formulações avaliadas.
- Comparação de tamanho dos flocos, turbidez e OG residual.
- Polímero adicionado após a pré-coagulação.

Flotatest - Relação A/S Ótima

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de Flotatest em planejamento fatorial 4×3. Efluente condicionado com $FeCl_3$ (100 mg/L) + CPAM (8 mg/L). A/S calculada pela Equação [1] de Dantas (UFRN), com Sa = 17,8 mL/L (22 °C), f = 0,5. Média de triplicatas.

Ensaio	P (kPa)	R (%)	A/S (mL/mg)	Rem. OG (%)	Rem. SST (%)	Rem. DQO (%)	Turbidez (uT)
E1	300	15	0,006	62,1	71,4	38,2	185
E2	300	25	0,010	74,8	81,2	46,5	128
E3	300	35	0,014	82,3	87,6	52,1	94
E4	400	25	0,013	85,4	89,8	56,3	78
E5	400	35	0,018	92,7	93,4	63,8	48
E6	400	50	0,026	94,1	94,8	66,2	42
E7	500	35	0,022	93,8	94,2	65,1	45
E8	500	50	0,031	96,4	96,1	70,8	31
E9	500	70	0,044	96,8	96,5	71,4	28
E10	600	50	0,037	96,1	95,8	69,4	33
E11	600	70	0,052	97,0	96,9	72,3	25
E12	600	100	0,074	97,2	97,1	73,0	23

Fonte: Autor (2026).

- Doze condições operacionais reportadas.
- Pressão de 300–600 kPa e recirculação variável.
- Ensaios em triplicata; análise de remoção de OG, SST e DQO.

Resultados - seleção de coagulante e polímero

Seleção do Coagulante:
O $FeCl_3$ (100 mg/L, pH 6,5) apresentou o melhor resultado, atingindo potencial zeta de -2 mV e turbidez do floculado de 54 uT.

Seleção do Polímero:
A Poliacrilamida Catiônica (CPAM 40% cat., $14x10^6$ Da) na dosagem de 8 mg/L foi a mais eficiente.

Relação A/S:

Os ensaios de Flotatest revelaram influência altamente significativa da pressão e da taxa de recirculação sobre a remoção de OG e SST, com interação significativa entre os fatores, confirmando que a relação A/S, que integra ambas as variáveis, é o parâmetro central de desempenho do sistema, conforme previsto pela equação de Dantas [1].

Resultados e discussão - desempenho da FAD

Tabela 10 - Desempenho da FAD na condição ótima (P = 500 kPa, R = 50%, $FeCl_3$ = 100 mg/L, CPAM = 8 mg/L, pH = 6,5) versus Resolução CONAMA nº 430/2011. (*) Tratamento biológico complementar necessário para atendimento do limite de DBO_5.

Parâmetro	Afluente (mg/L)	Efluente FAD ótimo (mg/L)	Remoção (%)	CONAMA 430/2011	Atende?
DQO total	4.820	1.398	71,0	—	—
DBO_5	2.610	628	75,9	≤ 60 mg/L	Não*
SST	1.840	70	96,2	≤ 100 mg/L	Sim
Óleos e graxas	860	28	96,7	≤ 50 mg/L	Sim
NTK	168	142	14,3	—	—
Fósforo total	32	18	43,8	—	—
Turbidez	—	25 uT	—	—	—
pH	6,7	7,1	—	5,0–9,0	Sim

Fonte: Autor (2026).

- **OG: 28 mg/L ≤ 50 mg/L ✓**
- **SST: 70 mg/L ≤ 100 mg/L ✓**
- **A FAD sozinha não atende à DBO_5**

QUEDA DA CARGA ORGÂNICA

- DQO: 4.820 → 1.398 mg/L
- DBO_5: 2.610 → 628 mg/L

Conclusões

Alta Eficiência no Pré-Tratamento: A tecnologia FAD atinge remoções de 90% a 98% de óleos e graxas (OG) e de 88% a 97% de sólidos suspensos (SST).
Condições Operacionais Ótimas: Para efluentes típicos, o dimensionamento exige relação A/S entre 0,010 e 0,020 mL/mg, operando com pressões de 350 a 500 kPa e recirculação de 25% a 50%.
Condicionamento Químico Dual: A combinação de coagulante inorgânico ($FeCl_3$ ou PAC) com polímero catiônico (CPAM de alto peso molecular) entrega o melhor desempenho de separação.
Complemento Biológico Indispensável: A FAD não atende integralmente a legislação de lançamento de forma isolada, exigindo tratamento biológico posterior para DBO, DQO residual e nutrientes.
Validação Prática Obrigatória: O uso de ensaios de Flotatest com o efluente real é etapa obrigatória para validar a relação A/S e as dosagens químicas antes do dimensionamento do sistema em escala real.

FAD + tratamento biológico (e polimento quando necessário) = estratégia mais robusta para atender aos padrões de lançamento.

Obrigado!

Halice Jerônimo de Araújo Silva

halice.araujo@ufpe.br
(81) 98759-3572
@licearauj

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Coautores

Mayra Angelina Quaresma Freire
Mayra.angelina@ufpe.br
(81) 99147-8847

Maria Clara Quaresma Freire
mcqf@poli.br
(81) 98537-7695

André Victor Freire da Silva
avfs@poli.br
(81) 98444-8590

André Farias da Silva
Andrevfs11@gmail.com
(82) 98174-9552