

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO TRATAMENTO  
SECUNDÁRIO DE EFLUENTE DA ARACRUZ CELULOSE



Marcelo Montanhese de Lima  
Alberto Carvalho de Oliveira Filho  
Luiz Fernando Torres Pinto  
Reinaldo Garcia Neves  
Aracruz Celulose S.A. - Aracruz - Brasil

Douglas A. Barton  
NCASI, Northeast Regional Center - Medford - EUA

### Resumo

O consumo de energia elétrica nas lagoas aeradas mecanicamente é o principal item de custo e controle operacional do tratamento secundário de efluentes.

Com base na simulação do sistema de tratamento em computador, foram realizados testes de otimização da quantidade e distribuição de aeradores nas lagoas, visando reduzir o consumo de energia e o custo operacional.

Os resultados obtidos indicam ser possível, através da distribuição otimizada de aeradores, reduzir o consumo de energia em até 24%, sem modificações significativas da qualidade do efluente final.

Esses resultados também validam o uso do software SASBV2 (NCASI) para a modelagem do tratamento biológico, visando novas otimizações do sistema.

### Abstract

The power consumption is an important operational cost component of the biological treatment, when mechanical aerators are applied to promote the effluent oxygenation.

According with previous computer simulations, an industrial trial was carried out to optimize the aerator distribution by each basin. Results show that it is possible to reduce 24% of the aeration power, with no significant modifications of the effluent quality.

The planning of effluent treatment optimizations using the software SASBV2 (NCASI) is thus recommended.

### 1. Introdução

Em 1991 entrou em operação o sistema de tratamento biológico de efluentes da Aracruz Celulose, com o objetivo de reduzir as concentrações de DBO, DQO, AOX, fenol e sólidos suspensos do efluente final.

O princípio do sistema é o uso sequencial de lagoas aeradas e de estabilização (anaeróbicas), sendo utilizado aeradores de superfície para a transferência de oxigênio, garantindo as eficiências atuais de DBO (89%), DQO (45%), AOX (65%), fenol(85%) e sólidos suspensos (55%).

---

"Trabalho apresentado no 26º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, realizado em São Paulo-SP-Brasil, de 22 a 26 de novembro de 1993".

Apesar de não ser utilizado enriquecimento de nutrientes, as eficiências observadas foram maiores que as de projeto, assim foi identificada a possibilidade de otimizar o consumo de energia elétrica para aeração.

Para o planejamento dos testes em escala industrial foi necessário simular previamente os possíveis distúrbios em qualidade do efluente. Nesta fase foi realizado um trabalho com o National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Inc. - NCASI(EUA), utilizando um software de modelagem (SASBV2) que permite simular o tratamento biológico, quantificando os efeitos das suas variáveis operacionais sobre a DBO e sólidos suspensos.

Os resultados das simulações incentivaram a realização de teste industrial com diferentes quantidade de aeradores nas lagoas, visando avaliar a possibilidade de reduzir o consumo de energia com manutenção da qualidade do efluente tratado.

## 2. Revisão de Literatura

### 2.1. Tratamento secundário de efluentes por lagoas aeradas

O tratamento secundário por lagoas aeradas refere-se a um processo de remoção do material orgânico solúvel, através da oxigenação do efluente em lagoas pelo uso de aeradores mecânicos de superfície ou por adição via mangueiras de fundo ou misturadores.

O princípio básico envolvido neste tratamento é a redução do "nível de energia" do efluente, reduzindo assim a quantidade de oxigênio necessário à sua decomposição e tornando-o compatível com o meio ambiente no qual será lançado. Esta redução do "nível de energia" é decorrente da conversão da matéria orgânica solúvel em compostos mais simples ( $CO_2, N_2, H_2O$ ) devido à ação de microorganismos, principalmente bactérias, durante a retenção nas lagoas.

O princípio das lagoas aeradas visa reduzir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), entretanto apresenta também grande eficiência para redução de outras características como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Fenóis, Adsorbable Organically-Bound Halogen (AOX) e Carbono Orgânico Total (TOC).

As condições operacionais do tratamento devem satisfazer as necessidades desses microorganismos, pois afetam diretamente as taxas de desenvolvimento bacteriológico.

Alguns parâmetros do processo de tratamento biológico são:

#### a) nutrientes

Esse parâmetro afeta o crescimento ótimo da população biológica, a qual depende da disponibilidade de nutrientes essenciais. Apesar de existir uma relação geral entre DBO:N:P de 100:5:1, outras variáveis do processo podem modificar os valores mínimos exigidos, como temperatura e quantidade de aeração.

#### b) temperatura

Refere-se a um dos mais importantes fatores que afeta o crescimento dos microorganismos, sendo que um acréscimo de  $10^\circ C$  dobra a taxa de crescimento, até a temperatura de  $35^\circ C$ . Após isto ocorre uma redução gradual do crescimento, tendendo a zero em temperaturas próximas a  $50^\circ C$ . No caso de lagoas aeradas o aumento da temperatura causa uma perda na eficiência de DBO, além de dificultar a transferência de oxigênio para o líquido.

### c) pH

Assim como a temperatura, também o pH afeta a atividade dos microorganismos, sendo recomendada a faixa ideal entre 6 e 8,5. Normalmente o tratamento em lagoas de aeração apresenta uma variação muito pequena de pH, devido a ação tampão do sistema. No caso de efluentes alcalinos, ocorre a neutralização natural devido ao CO<sub>2</sub> formado durante a respiração celular, reagindo com hidróxidos e carbonatos e gerando bicarbonatos, os quais são responsáveis pelo "efeito tampão" do sistema.

## 2.2 Tratamento biológico da Aracruz Celulose

O tratamento biológico da Aracruz Celulose consiste de 6 lagoas, sendo 4 aeradas e 2 anaeróbicas (estabilização). Os tempos de tratamento são de 96 horas na fase aerada e 48 horas na anaeróbica, totalizando cerca de 6 dias de retenção.

A distribuição de aeradores nas 4 primeiras lagoas, conforme o projeto, é 12:12:26:10, respectivamente. As principais características dos aeradores são: aerador flutuante, potência de acionamento 30 kWh, taxa de transferência 1,50 kg O<sub>2</sub>/kWh e rotação 86,8 rpm.

Quanto aos nutrientes, o projeto da Aracruz não utiliza nenhum produto para enriquecer a relação DBO:N:P, a qual é atualmente de 100:2:0,5 com ótimas eficiências de remoção de DBO.

## 2.3. Simulação em computador

Como etapa prévia ao delineamento do teste, foram realizadas simulações em computador, visando otimizar a distribuição de aeradores por lagoa que permita minimizar o consumo de energia com manutenção da qualidade do efluente tratado.

O software utilizado foi desenvolvido pelo National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Inc. - NCASI(EUA), e permite estimar as variações de DBO e sólidos suspensos do efluente em função das condições operacionais das lagoas, tais como dimensões das lagoas, distribuição de aeradores por lagoa e características do efluente como vazão, temperatura, DBO, sólidos suspensos e teor de nutrientes.

O modelo tem sido utilizado por diversas fábricas de celulose, na tentativa de otimizar o sistema de tratamento de efluentes, seja para determinar dimensões das lagoas e quantidade de aeradores (projeto) ou para estudos de minimização do consumo de energia.

Em termos gerais o programa de computador é um conjunto de equações diferenciais, programadas em linguagem FORTRAN, que descrevem o processo de tratamento biológico, desenvolvido para simular tratamentos de efluente semelhantes ao utilizado na Aracruz Celulose.

As principais fases do modelo de computador são:

- modelagem hidráulica das lagoas.
- simulação das taxas de transferência de oxigênio e consumo para síntese celular e respiração endógena.
- simulação da remoção de DBO, com base em relações cinéticas que consideram efeito da temperatura, formação de sólidos biológico, oxigênio dissolvido e nutrientes.

A remoção de DBO, e os efeitos associados à geração de sólidos biológicos, são definidos por relações mecánísticas as quais baseiam-se nos princípios cinéticos de crescimento bacteriológico.

### 3. Planejamento do Teste Industrial

#### 3.1. Níveis de aeração testados

A principal variável testada foi o consumo total de energia para aeração das lagoas. Também foram avaliadas diferentes distribuições de uma mesma energia total aplicada, sempre visualizando manter a qualidade do efluente com otimização do custo operacional.

Após a calibração do modelo, foram projetados os valores de DBO do efluente tratado para diferentes condições de aeração das lagoas, visando identificar as condições de teste que não aumentaria demais este parâmetro do efluente.

O teste industrial foi, então, dividido em diversas fases, onde avaliou-se os efeitos do número total e distribuição de aeradores nas lagoas, conforme apresentado na tabela I.

Tabela I. Condições de teste nas lagoas de aeração.

FASE	DIAS (a)	No. DE AERADORES POR LAGOA				ECONOMIA DE ENERGIA %
		LAGOA	LAGOA	LAGOA	LAGOA	
		1	2	3	4	
REFERÊNCIA	19	12	12	23	8	-
FASE 1	15	8	12	23	8	7,3
FASE 2	14	8	6	18	10	24,0
FASE 2	32	8	6	18	7	29,0
FASE 3	7	11	6	18	4	29,0

(a) Não considerado 3 dias de transição entre as fases do teste.

#### 3.2. Caracterização da qualidade do efluente

Os efluentes foram amostrados na entrada e saída do tratamento em lagoas e analisados diariamente quanto aos parâmetros DQO, DBO, AOX, Sólidos suspensos, Cor, pH e Temperatura.

As informações operacionais do tratamento de efluentes foram monitoradas com acompanhamento horário do número de aeradores por lagoa e medição contínua da vazão de efluente. A redução dos aeradores nas lagoas respeitaram um rodízio dos equipamentos, conforme necessidades de manutenções dos equipamentos.

### 4. Resultados

#### 4.1. Resultados da simulação em computador

A primeira etapa para a simulação foi a calibração do modelo, onde se utilizou os valores mensais de DBO do período de setembro à dezembro/92 para determinar os parâmetros cinéticos do tratamento da Aracruz.

A fase de calibração apresentou um ótimo ajuste do modelo para a simulação do DBO do efluente tratado. A correlação entre os valores analisados e estimados apresentou um coeficiente  $r=0,99$ .

Ajustada a calibração do modelo, foram projetadas as possíveis condições de aeração das lagoas que, durante os testes, não aumentasse a DBO do efluente.

Realizado o teste industrial, o próximo passo foi a validação do uso do modelo, através da comparação dos valores de DBO analisados em laboratório contra os valores estimados previamente, para cada uma das situações testadas na prática.

O ajuste entre estes valores de DBO foi satisfatório, com um elevado coeficiente de correlação ( $r = 0,93$ ).

Os resultados práticos confirmam a utilidade da simulação do tratamento biológico em computador, tornando disponível uma importante ferramenta de otimização das lagoas, conforme figura 1.

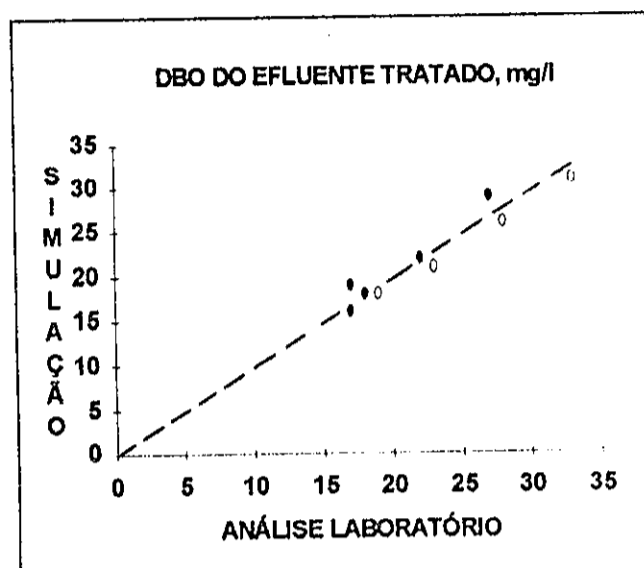


Figura 1. Avaliação do modelo de simulação para estimativas de DBO.

Legenda:                   •=condições de teste  
                              o=calibração do modelo

Com base nas simulações em computador apenas a situação de 29% de economia, com redução principal nas últimas lagoas, apresentava potencial de aumento do DBO, o que foi confirmado pelos testes nas lagoas (item 4.2).

O potencial de aplicação desse modelo em computador, é a avaliação prévia de novas condições de operação das lagoas, verificando a tendência de aumento dos valores de DBO para novas situações operacionais do tratamento, tais como temperatura, vazões, efeito de parada da fábrica e outras.

Existe, porém, a necessidade de se avaliar o efeito dessa redução sobre o teor de sólidos suspensos. Apesar do modelo de simulação permitir avaliar esta característica, ainda não foi obtida uma calibração satisfatória. Quanto à DQO, a qual não é modelada neste software, a forte relação existente entre DQO:DBO garante um comportamento similar às variações observadas para a DBO.

#### 4.2. Resultados do teste industrial

A tabela II apresenta as variações das características do efluente tratado em função das reduções de aeradores nas lagoas.

Tabela II. Efeito da redução de aeração sobre a qualidade do efluente.

CARACTERÍSTICAS	EFEITO DOS AERADORES	REDUÇÃO DE AERADORES, %				
		0	7	24	29 (a)	29 (b)
Sólidos suspensos, mg/L	SIG	33	36	44	43	74
Cor, mg (Pt)/L	N.S.	1287	1185	1155	1340	1220
Temperatura, oC	SIG	30	34	32	33	34
DQO, mg O <sub>2</sub> /L	SIG	391	347	445	415	522
DBO, mg O <sub>2</sub> /L	SIG	18	17	22	17	27
AOX, mg/L	N.S.	6,6	6,8	5,5	6,5	5,8

(a) redução de aeradores nas primeiras lagoas.

(b) redução de aeradores nas últimas lagoas.

SIG - houve efeito sobre o parâmetro.

N.S. - não houve efeito sobre o parâmetro.

Como referência para as comparações considerou-se o período de operação com 55 aeradores, a qual era a situação normal de trabalho antes dos testes. Convém salientar que esta já é uma condição de menor consumo em relação ao projeto, o qual considera 60 aeradores no total.

As figuras 2 a 7 ilustram as mudanças nas características do efluente tratado em função das reduções de energia de aeração.

As características Cor e AOX não foram afetadas pela redução de aeradores. Quanto a cor do efluente, é conhecido que não ocorre diminuição devido ao tratamento em lagoas de aeração, explicando os resultados obtidos.

A temperatura do efluente tratado apresentou uma tendência de aumento com a redução da aeração, elevando-se de 30°C na fase referência para 34°C na redução máxima de 29%.

Verificou-se efeito da redução da aeração sobre a DBO e sólidos suspensos, promovendo aumentos de 50% e 124% respectivamente, na situação operacional de máxima redução de aeradores.

A exemplo do verificado para a DBO, também foi notada tendência de aumento da DQO com a menor aeração. A DQO também é um indicador do "nível de energia" do efluente e apresenta uma forte relação com a DBO, sendo usualmente estimada pela relação DQO:DBO.

Conciliando todos os resultados das etapas testadas, conclui-se que foi possível operar as lagoas com 24% a menos de energia sem problemas para a qualidade do efluente, sendo a melhor condição dentre as opções avaliadas.

Além da aeração total aplicada, a sua distribuição nas lagoas apresentou-se como uma importante variável operacional. Nota-se, que para a mesma redução total de aeração (29%), a distribuição de aeradores por lagoa foi crítica para a elevação dos sólidos suspensos.

Quando a maior redução foi feita na quarta lagoa (última aerada) ocorreu flotação de placas de lodo biológico presente no fundo da lagoa, resultando em altos valores de sólidos suspensos e na interrupção da etapa. No mesmo raciocínio, quando a redução principal foi na primeira lagoa o problema não foi notado.

A etapa com redução principal de aeradores na primeira lagoa, e as simulações em computador, indicam possibilidade de se obter maiores economias de energia, desde que observada a alocação otimizada de aeradores em cada lagoa.

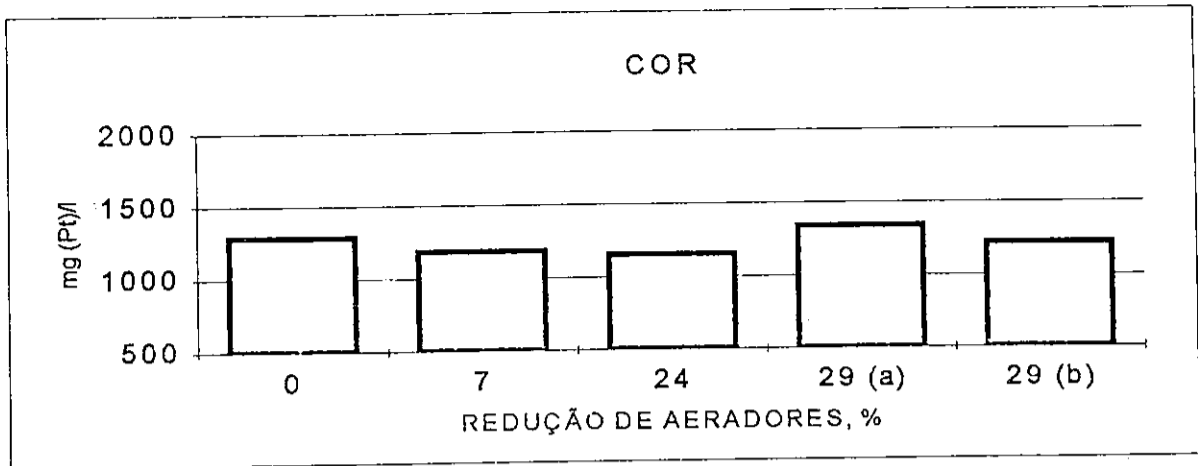


Figura 2. Efeito da redução de aeração na cor do efluente.

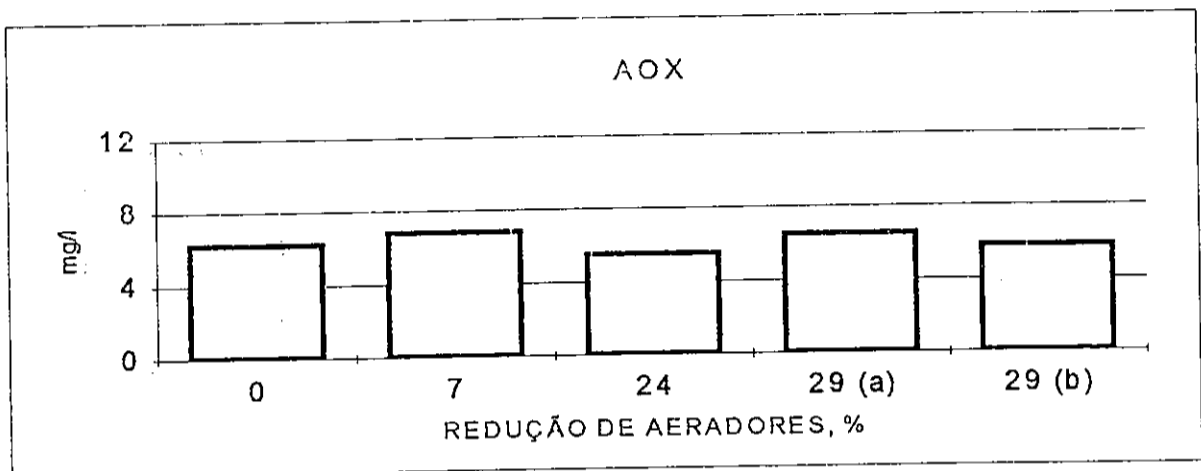


Figura 3. Efeito da redução de aeração no AOX do efluente.

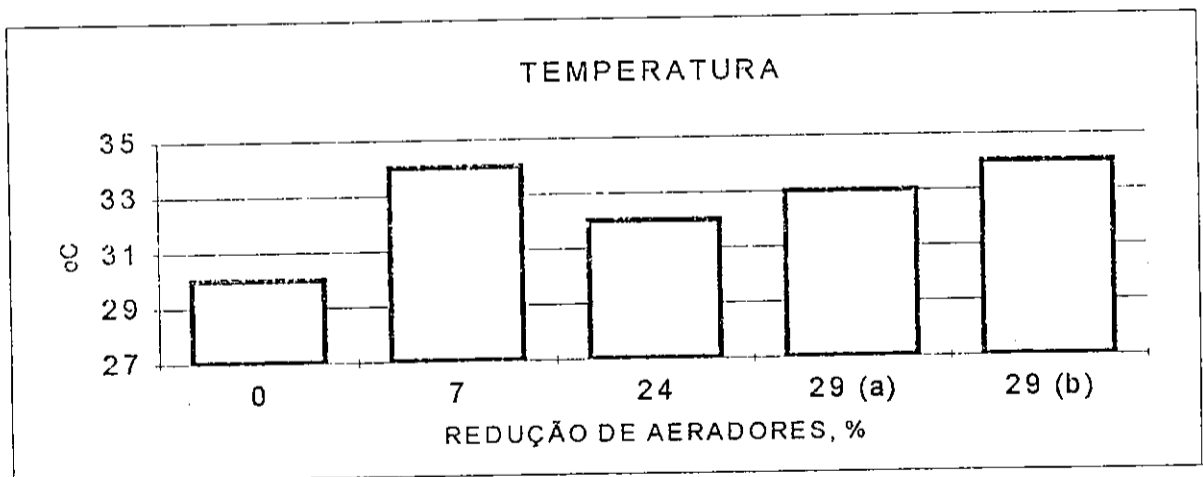


Figura 4. Efeito da redução de aeração sobre a temperatura.

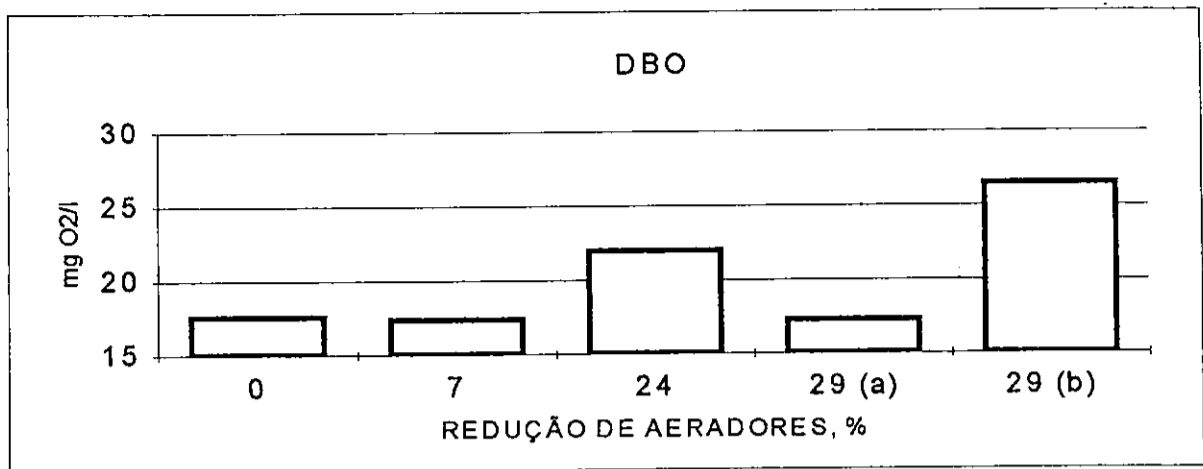


Figura 5. Efeito da redução de aeração sobre a DBO do efluente.

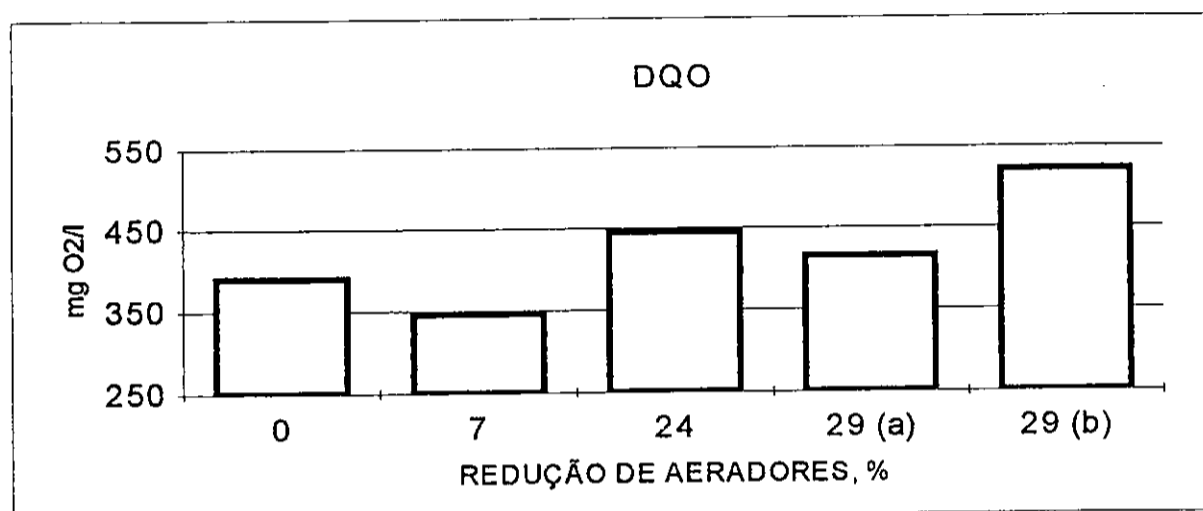


Figura 6. Efeito da redução de aeração sobre a DQO do efluente.

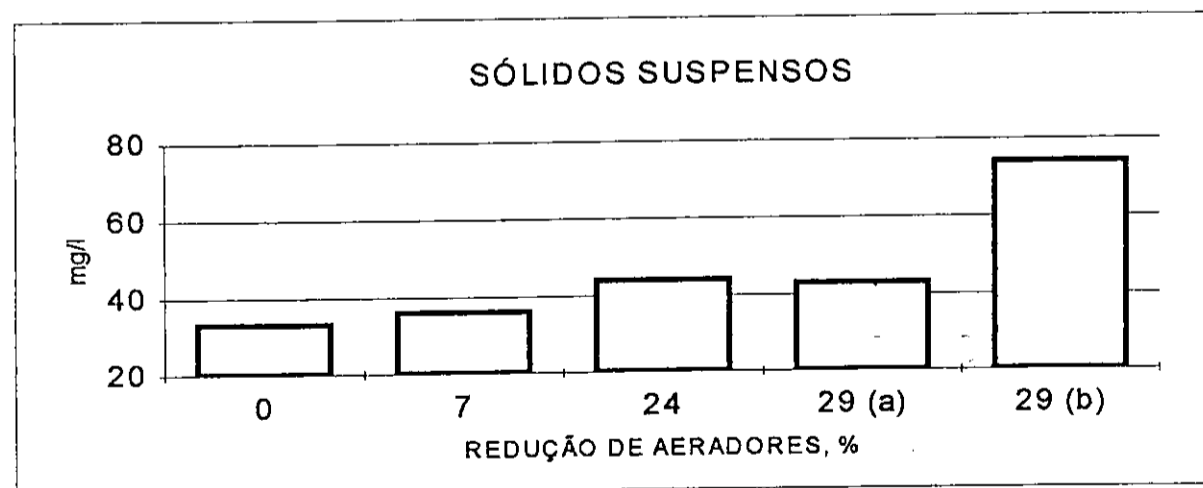


Figura 7. Efeito da redução de aeração sobre sólidos suspensos.



A tabela III e a figura 8, apresentam as condições operacionais usadas em cada etapa do teste e as respectivas economias anuais de energia, expressas em MWh/ano e também em US\$/ano, não incluindo os menores custos de manutenção dos aeradores retirados.

Conforme identificado na avaliação da qualidade do efluente tratado, a condição de 24% de redução de aeradores (55 para 39) permite uma economia significativa de energia elétrica, equivalendo a US\$ 37.000 por ano.

Em termos de redução do custo operacional de produção de celulose branqueada estima-se o equivalente a US\$0,04/tsa.

Tabela III. Economia de energia obtida nos testes.

ETAPA DE TESTE (REDUÇÃO %)	No. DE AERADORES POR LAGOA					ECONOMIA ANUAL	
	LAGOA	LAGOA	LAGOA	LAGOA	TOTAL	MWh	US\$ (c)
	1	2	3	4			
Referência	12	12	23	8	55	-	-
7%	8	12	23	8	51	1.057	11.315
24%	8	6	18	10	42	3.437	36.772
29%(a)	8	6	18	7	39	4.230	45.258
29%(b)	11	6	18	4	39	4.230	45.258

(a) reduções nas primeiras lagoas.

(b) reduções nas últimas lagoas.

(c) custo da energia gerada estimado em US\$10,70/MWh.

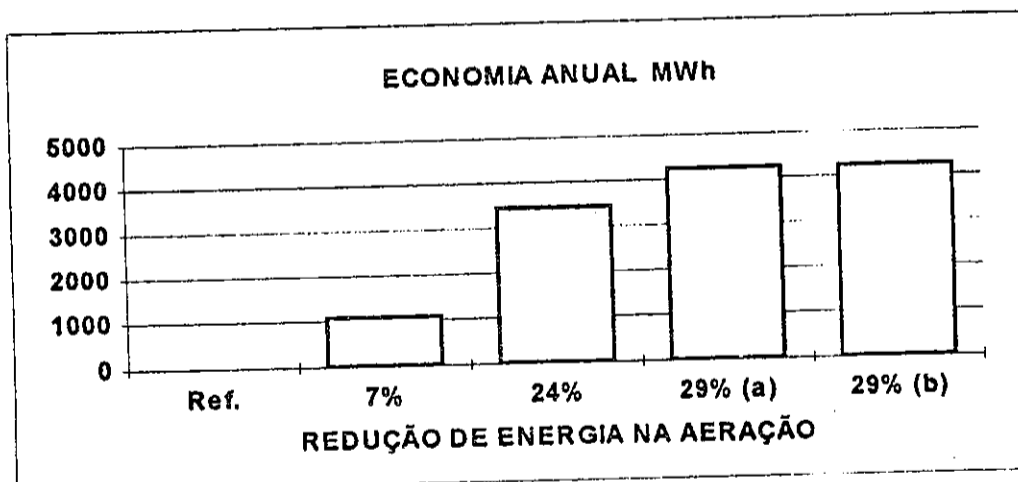


Figura 8. Economia anual para cada situação de redução de energia.

## 5. Conclusões

Realizou-se um teste industrial visando reduzir o consumo de energia elétrica no tratamento biológico de efluentes, principal item do custo operacional.

As situações operacionais usadas durante o teste foram estabelecidas com base em simulações com o software SASBV2 (NCASI) quanto aos valores de DBO do efluente, visando definir a redução máxima de aeradores que não compromettesse a sua qualidade.

Os resultados obtidos permitiram implementar uma redução do consumo de energia de 24%, através da distribuição otimizada de aeradores nas lagoas, sem modificações significativas das características do efluente final.

Conclue-se, também, que os resultados obtidos na simulação foram confirmados no teste industrial, validando o software SASBV2 (NCASI) para a modelagem do tratamento biológico. Esta ferramenta apresenta potencial de utilização para o planejamento de novas otimizações do sistema.

## 6. Literatura Citada

Rezende, D.B. e Montenegro, E.S. "Tratamento de Efluentes Líquidos". Manual de Treinamento da ETE da Aracruz Celulose. Aracruz (ES), 1991.

IPT "Tratamento de Efluentes". 2o. Curso Pan-Americano de Especialização em Celulose e Papel. São Paulo (SP), 1987.

NCASI "User Manual For NCASI Aerated Stabilization Basin Model (SASBV2) And Guidance For Its Use". Technical Bulletin 458. New York (NY), 1985.

NCASI "Wastewater Treatment Modeling Seminar Overheads". Mobile (AL), 1992.

NCASI "A Review of Water Quality Mathematical Models And Considerations In Their Application To Pulp And Paper Mill Receiving Water Quality Studies". Technical Bulletin 297. New York (NY), 1977.

NCASI "A Study Of The Selection, Calibration And Verification Of Mathematical Water Quality Models". Technical Bulletin 367. New York (NY), 1982.