

OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE PAPEL E CELULOSE

OPTIMIZING WATER USE IN PAPER AND PULP PRODUCTION PROCESSES.

Ivone Cristina Barros Pedroza¹
Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani²

Resumo – O Brasil é o segundo maior produtor de papel e celulose, indústria que utiliza grandes volumes de recursos naturais, como água e energia, e gera impactos ambientais. Os grandes desafios são a disponibilidade de água bruta e limitações na descarga de águas residuais. Nesse trabalho apresenta-se um modelo de otimização para a redução do consumo de água fresca e do custo total anual em indústrias da produção de papel e celulose. O modelo proposto possui formulação de programação não linear inteira mista (MINLP), contendo termos bilineares. Utilizou-se a estratégia de bound contraction para a solução do modelo, buscando a minimização do consumo de água fresca e do custo total anual, por meio da implementação de processos de reuso e regeneração de água. Um estudo de caso da literatura foi utilizado para testar a aplicabilidade do modelo desenvolvido. Os resultados apresentaram sempre a solução para o ótimo global. Pode-se concluir que a estratégia utilizada foi apropriada para a solução do modelo proposto e pode contribuir tanto para uma reavaliação de redes de água já existentes, quanto para o projeto de novas redes, em processos de produção de papel e celulose.

Palavras-chave: Otimização. MINLP. Bound Contraction. Reuso de água. Papel e celulose.

Abstract - Brazil is the second largest producer of paper and pulp, an industry that uses large volumes of natural resources, such as water and energy, and generates environmental impacts. The major challenges are the availability of raw water and limitations in wastewater discharge. This work presents an optimization model for reducing fresh water consumption and the total annual cost in paper and pulp production industries. The proposed model has a mixed integer nonlinear programming (MINLP) formulation, containing bilinear terms. The bound contraction strategy was used to solve the model, seeking to minimize fresh water consumption and the total annual cost through the implementation of water reuse and regeneration processes. A case study from the literature was used to test the applicability of the developed model. The results always presented the solution for the global optimum. It can be concluded that the strategy used was appropriate for solving the proposed model and can contribute both to a reassessment of existing water networks and to the design of new networks in paper and pulp production processes.

Keywords: Optimization. MINLP. Bound Contraction. Water reuse. Pulp and paper.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor mundial de papel e celulose, indústria que utiliza grandes volumes de recursos naturais e gera impactos ambientais. Os grandes desafios são a disponibilidade de água fresca e limitações na descarga de efluentes. O consumo típico de água nessas indústrias é de 10 a 50 m³ por tonelada seca ao ar de polpa celulósica produzida. Nas últimas décadas o Brasil se preparou para ter maior projeção na produção

¹Doutoranda em Engenharia Química (UEM/Maringá-PR); pedrozaivone@gmail.com.

²Doutor em Engenharia Química (UEM/Maringá-PR); Docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá. Contato: massravagnani@uem.br.

mundial de celulose. O país atualmente figura entre aqueles com as maiores áreas de florestas plantadas. Cerca de 10,5 milhões de hectares para fins industriais em 2024 foram destinadas à produção de celulose e papel, o que representa uma pequena fração do território nacional (IBÁ, 2024).

Em termos globais, a produção mundial de papel e celulose em 2021 atingiu 428,51 milhões de toneladas, o que representa uma taxa de crescimento de 6,6%, representando uma taxa de crescimento de 6,6 % em relação ao ano de 2020, que foi de 401,81 milhões de toneladas (IBÁ, 2024).

A reutilização de águas residuais é uma alternativa promissora para processos que são grandes demandantes de água, permitindo reduzir a demanda sobre os mananciais ao estimular a substituição da água fresca por uma água de qualidade inferior, que pode ser utilizada para fins menos nobres. Diversos estudos demonstram a importância da reutilização e regeneração de águas no setor da produção de papel e celulose para reduzir o consumo hídrico e a geração de efluentes. Yang *et al.* (2000) apresentaram um modelo para a minimização do consumo de água e a geração de efluentes aquosos em uma indústria de papel. Foram considerados como parâmetros os sólidos suspensos totais (SST) e demanda química de oxigênio (DQO). O estudo não leva em conta o custo de capital e nem o custo com tubulações, pois os considera desprezíveis em relação ao custo operacional, assim como não considera processos de regeneração, se restringindo à possibilidade de máximo reuso das correntes de água. No caso estudado, os autores conseguiram uma redução no consumo de água de 21,4% e de 33,4%, considerando simples e múltiplos contaminantes, respectivamente.

Moreira (2020) analisou dados de consumo de água e a geração de efluentes, divulgados pela empresa Suzano Papel e Celulose dos anos de 2014 a 2018 a fim de avaliar se o sistema de gestão ambiental da empresa possui melhorias ou se é eficaz. Constatou-se que, em média, 77% da água captada voltou aos rios como forma de efluente líquido tratado, embora em 2016 esse percentual tenha caído para 73%. A empresa não aborda iniciativas de redução de geração de efluentes em seus relatórios. Os autores concluíram que a empresa possui um sistema de gestão ambiental bem implantado, com prioridade para o consumo de água, mas a melhoria contínua dos processos deve ser considerada a fim de reduzir os impactos ambientais causados pelo processo.

Técnicas de otimização são alternativas para a integração entre o tratamento de efluentes e os sistemas de reuso e regeneração de água em processos industriais. O desenvolvimento de modelos de otimização com ênfase na minimização do consumo de água fresca e do custo total anual do processo pode auxiliar de forma definitiva na solução do problema em indústrias de papel e celulose. Uma abordagem de otimização determinística bastante interessante é a técnica de *bound contraction* (BC), baseada na redução progressiva da distância entre os limites superior e inferior das variáveis do problema, mediante a contração desses limites em restrições que apresentam termos bilineares.

Considerando a alta demanda hídrica e os impactos ambientais em processos industriais de produção de papel e celulose, o objetivo do presente trabalho foi propor um modelo de otimização para a minimização do consumo de água fresca e do custo total anual do processo, considerando as possibilidades de reuso e regeneração de água. O modelo possui a formulação *Mixed Integer NonLinear Programming* (MINLP) e a estratégia de *bound contraction* foi utilizada para a solução do modelo nos termos bilineares, visando obter redes de água ótimas.

II. METODOLOGIA

O modelo desenvolvido foi baseado no trabalho de Faria e Bagajewicz (2011) para o problema de alocação de água, que consiste em definir um projeto de rede que minimize a demanda de água fresca, visando o menor custo possível. Os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo são apresentados a seguir.

Índices

u	Unidade de água
w	Fontes de água doce
s	Reservatórios de águas residuais
r	Processos regenerativos
c	Contaminantes

Parâmetros

$\Delta M_{u,c}$	Carga mássica
$C_{u,c}^{in,max}$	Concentração de contaminante na entrada da unidade
$C_{u,c}^{out,max}$	Concentração de contaminante na saída da unidade
$C_{s,c}^{out,max}$	Concentração de contaminante na saída dos reservatórios
$CW_{w,c}$	Concentração de contaminante na fonte
$CRF_{r,c}^{out}$	Concentração de saída do contaminante (tratado) para os processos de regeneração (parâmetro)
$CS_{s,c}^{discharge,max}$	Concentração máxima de saída do contaminante no reservatório
CCR_r	Custo capital dos processos regenerativos
$consu$	Consumo de água doce
$CU_{u,c}^{out}$	Concentração de saída do contaminante na unidade
$CR_{r,c}^{out}$	Concentração de saída do contaminante (não tratado) para os processos de regeneração (variável)
CO	Custo operacional
df	Depreciação anual
F_{max}	Vazão máxima através das conexões
F_{min}	Vazão mínima através das conexões
fwc_w	Custo de água doce
$FWUC_{w,u}$	Custo fixo das conexões entre a fonte e as unidades
$FWRC_{w,r}$	Custo fixo das conexões entre a fonte e os processos regenerativos
$FWSC_{w,s}$	Custo fixo das conexões entre a fonte e os reservatórios
$FUUC_{u,u^*}$	Custo fixo das conexões entre as unidades
$FURC_{u,r}$	Custo fixo das conexões entre as unidades e os processos regenerativos
$FUSC_{u,s}$	Custo fixo das conexões entre as unidades e os reservatórios
$FRUC_{r,u}$	Custo fixo das conexões entre os processos regenerativos as unidades
$FRRC_{r,r^*}$	Custo fixo das conexões entre os processos regenerativos
$FRSC_{r,s}$	Custo fixo das conexões entre os processos regenerativos e os reservatórios
FRC_r	Custo fixo dos processos regenerativos
FCI	Custo capital
$FWU_{w,u}$	Vazão de água entre a fonte e a unidade
FUU_{u,u^*}	Vazão entre as unidades
$FRU_{r,u}$	Vazão entre os processos regenerativos e as unidades
$FUS_{u,s}$	Vazão entre as unidades e o reservatório

$FUR_{u,r}$	Vazão entre as unidades e os processos regenerativos
$FWR_{w,r}$	Vazão entre a fonte e os processos regenerativos
FRR_{r,r^*}	Vazão entre os processos regenerativos
$FRS_{r,s}$	Vazão entre os processos regenerativos e os reservatórios
FR	Vazão durante os processos regenerativos
OPN_r	Custo operacional dos processos regenerativos
OP	Horas trabalhadas
$RR_{r,c}$	Taxa fixa de remoção do contaminante nos processos regenerativos
TAC	Custo total anual
$VWUC_{w,u}$	Custo variável das conexões entre as fontes de água doce e as unidades
$VWRC_{w,r}$	Custo variável das conexões entre a fonte e os processos regenerativos
$VWSC_{w,s}$	Custo variável das conexões entre a fonte e os reservatórios
$VUUC_{u,u^*}$	Custo variável das conexões entre as unidades
$VURC_{u,r}$	Custo variável das conexões entre as unidades e os processos regenerativos
$VUSC_{u,s}$	Custo variável das conexões entre as unidades e os reservatórios
$VRUC_{r,u}$	Custo variável das conexões entre os processos regenerativos as unidades
$VRRC_{r,r^*}$	Custo variável das conexões entre os processos regenerativos
$VRSC_{r,s}$	Custo variável das conexões entre os processos regenerativos e os reservatórios
$ZUU_{u,u^*,c}$	Vazão de contaminantes entre as unidades
$ZUS_{u,s,c}$	Vazão de contaminantes entre as unidades e os reservatórios
$ZUR_{u,r,c}$	Vazão de contaminantes entre as unidades e os processos regenerativos
$ZRU_{r,u,c}$	Vazão de contaminantes entre os processos regenerativos e as unidades
$ZRR_{r,r^*,c}$	Vazão de contaminantes entre os processos regenerativos
$ZRS_{r,s,c}$	Vazão de contaminantes entre os processos regenerativos e os reservatórios

Variáveis binárias

$ywu_{w,u}$	Existência de conexão entre a fonte e as unidades
yuu_{u,u^*}	Existência de conexão entre as unidades
$yuS_{u,s}$	Existência de conexão entre as unidades e os reservatórios
$yur_{u,r}$	Existência de conexão entre as unidades e os processos regenerativos
$yrU_{r,u}$	Existência de conexão entre os processos regenerativos as unidades
$yrS_{r,s}$	Existência de conexão entre os processos regenerativos e os reservatórios
yrR_{r,r^*}	Existência de conexão entre os processos regenerativos
$yws_{w,s}$	Existência de conexão entre a fonte e os reservatórios
$ywr_{w,r}$	Existência de conexão entre a fonte e os processos regenerativos
$xcr_{r,c}$	Existência de conexão entre os processos regenerativos e os contaminantes
yr_r	Existência de conexão processos regenerativos

As restrições do modelo e a função objetivo são apresentadas a seguir.

Balanço de água nas unidades:

$$\sum_w FWU_{w,u} + \sum_{u^*} FUU_{u^*,u} + \sum_r FRU_{r,u} = \sum_s FUS_{u,s} + \sum_{u^*} FUU_{u,u^*} + \sum_r FUR_{u,r}, \quad \forall u \quad (1)$$

Balanço de água nos processos regenerativos:

$$\sum_w FWR_{w,r} + \sum_u FUR_{u,r} + \sum_{r^*} FRR_{r^*,r} = \sum_s FRS_{r,s} + \sum_u FRU_{r,u} + \sum_{r^*} FRR_{r,r^*} \quad \forall r \quad (2)$$

Balanço de contaminantes nas unidades:

$$\begin{aligned} \sum_w CW_{w,c} FWU_{w,u} + \sum_{u^*} ZUU_{u^*,u,c} + \sum_r ZRU_{r,u,c} + \Delta M_{u,c} \\ = \sum_{u^*} ZUU_{u,u^*,c} + \sum_s ZUS_{u,s,c} + \sum_r ZUR_{u,r,c} \quad \forall u, c \end{aligned} \quad (3)$$

Concentração máxima de entrada nas unidades:

$$\begin{aligned} \sum_w CW_{w,c} FWU_{w,u} + \sum_{u^*} ZUU_{u^*,u,c} + \sum_r ZRU_{r,u,c} \\ \leq C_{u,c}^{in,max} \left(\sum_w FWU_{w,u} + \sum_{u^*} FUU_{u^*,u} + \sum_r FRU_{r,u} \right) \quad \forall u, c \end{aligned} \quad (4)$$

Concentração máxima de saída nas unidades:

$$\begin{aligned} \sum_w CW_{w,c} FWU_{w,u} + \sum_{u^*} ZUU_{u^*,u,c} + \sum_r ZRU_{r,u,c} + \Delta M_{u,c} \\ \leq C_{u,c}^{out,max} \left(\sum_r FUR_{u,r} + \sum_{u^*} FUU_{u,u^*} + \sum_s FUS_{u,s} \right) \quad \forall u, c \end{aligned} \quad (5)$$

Balanço de contaminantes nos processos regenerativos:

$$ZR_{r,c}^{in} = \sum_w CW_{w,c} FWR_{w,r} + \sum_u ZUR_{u,r,c} + \sum_{r^*} ZRR_{r^*,r,c} \quad (6)$$

Processos de regeneração são modelados, geralmente, usando concentrações fixas na saída:

$$ZR_{r,c}^{out} = \sum_u ZRU_{r,u,c} + \sum_{r^*} ZRR_{r,r^*,c} + \sum_s ZRS_{r,s,c} \quad \forall r, c \quad (7)$$

Para esse tipo de caso pode-se usar a seguinte equação:

$$ZR_{r,c}^{out} = ZR_{r,c}^{in} (1 - XCR_{r,c}) + \left(\sum_w FWR_{w,r} + \sum_u FUR_{u,r} + \sum_{r^*} FRR_{r^*,r} \right) CRF_{r,c}^{out} XCR_{r,c} \quad \forall r, c \quad (8)$$

Para os casos em que os processos de regeneração assumem uma taxa fixa de remoção de contaminante, usa-se a seguinte equação:

$$ZR_{r,c}^{out} = ZR_{r,c}^{in} (1 - RR_{r,c}) \quad \forall r, c \quad (9)$$

Vazão através dos processos regenerativos:

$$R = \sum_w FWR_{w,r} + \sum_u FUR_{u,r} + \sum_{r^*} FRR_{r^*,r} \quad (10)$$

Concentração máxima de saída nos reservatórios de água residuais:

$$\sum_u ZUS_{u,s,c} + \sum_r ZRS_{r,s,c} \leq CS_{s,c}^{out,max} \left(\sum_u FUS_{u,s} + \sum_r FRS_{r,s} \right) \quad \forall s, c \quad (11)$$

Vazões mínimas através das conexões:

$$FWU_{w,u} \geq FWU_{w,u}^{min} y_{wu,w,u} \quad \forall w, u \quad (12)$$

$$FUU_{u,u^*} \geq FUU_{u,u^*}^{min} y_{uu,u,u^*} \quad \forall u, u^* \quad (13)$$

$$FUS_{u,s} \geq FUS_{u,s}^{min} y_{us,u,s} \quad \forall u, s \quad (14)$$

$$FUR_{u,r} \geq FUR_{u,r}^{min} y_{ur,u,r} \quad \forall u, r \quad (15)$$

$$FRU_{r,u} \geq FRU_{r,u}^{min} y_{ru,r,u} \quad \forall r, u \quad (16)$$

$$FRS_{r,s} \geq FRS_{r,s}^{min} y_{rs,r,s} \quad \forall r, s \quad (17)$$

$$FRR_{r,r^*} \geq FRR_{r,r^*}^{min} yrr_{r,r^*} \quad \forall r, r^* \quad (18)$$

As restrições de vazão mínima são introduzidas quando pequenas vazões são indesejadas. Vazão máxima através das conexões:

$$FWU_{w,u} \leq FWU_{w,u}^{max} yw_{w,u} \quad \forall w, u \quad (19)$$

$$FUU_{u,u^*} \leq FUU_{u,u^*}^{max} yuu_{u,u^*} \quad \forall u, u^* \quad (20)$$

$$FUS_{u,s} \leq FUS_{u,s}^{max} yus_{u,s} \quad \forall u, s \quad (21)$$

$$FUR_{u,r} \leq FUR_{u,r}^{max} yur_{u,r} \quad \forall u, r \quad (22)$$

$$FRU_{r,u} \leq FRU_{r,u}^{max} yru_{r,u} \quad \forall r, u \quad (23)$$

$$FRS_{r,s} \leq FRS_{r,s}^{max} yrs_{r,s} \quad \forall r, s \quad (24)$$

$$FRR_{r,r^*} \leq FRR_{r,r^*}^{max} yrr_{r,r^*} \quad \forall r, r^* \quad (25)$$

Essas restrições são necessárias apenas quando se deseja minimizar o custo ou existem restrições nas capacidades de conexão. Quando o objetivo é o consumo mínimo de água fresca e sem limites de conexões, elas não são mais necessárias.

Vazão de contaminantes (contração):

$$ZUU_{u,u^*,c} = FUU_{u,u^*} * CU_{u,c}^{out} \quad \forall u, u^*, c \quad (26)$$

$$ZUS_{u,s,c} = FUS_{u,s} * CU_{u,c}^{out} \quad \forall u, s, c \quad (27)$$

$$ZUR_{u,r,c} = FUR_{u,r} * CU_{u,c}^{out} \quad \forall u, r, c \quad (28)$$

$$ZRU_{r,u,c} = FRU_{r,u} * CR_{r,c}^{out} (1 - xcr_{r,c}) + FRU_{r,u} * CRF_{r,c}^{out} * xcr_{r,c} \quad \forall r, u, c \quad (29)$$

$$ZRR_{r,r^*,c} = FRR_{r,r^*} * CR_{r,c}^{out} (1 - xcr_{r,c}) + FRR_{r,r^*} * CRF_{r,c}^{out} * xcr_{r,c} \quad \forall r, r^*, c \quad (30)$$

$$ZRS_{r,s,c} = FRS_{r,s} * CR_{r,c}^{out} (1 - xcr_{r,c}) + FRS_{r,s} * CRF_{r,c}^{out} * xcr_{r,c} \quad \forall r, s, c \quad (31)$$

Concentrações mínimas e máximas:

$$CR_{r,c}^{out,min} \leq CR_{r,c}^{out} \leq CR_{r,c}^{out,max} \quad \forall r, c \quad (32)$$

$$CU_{u,c}^{out,min} \leq CU_{u,c}^{out} \leq CU_{u,c}^{out,max} \quad \forall u, c \quad (33)$$

Função objetivo 1: Consumo de água fresca:

$$consu = \sum_w \sum_u FWU_{w,u} \quad (34)$$

Custo Operacional:

$$CO = \sum_w fwc_w * \sum_u FWU_{w,u} + \sum_r OPN_r * FR \quad (35)$$

Custo Total Anual:

$$TAC = OP * CO - df * FCI \quad (36)$$

Custo de capital:

$$\begin{aligned}
FCI = \sum_w \left(\sum_u (FWUC_{w,u} * ywu_{w,u} + VWUC_{w,u} * FWU_{w,u}) + \right. \\
\left. \sum_r (FWRC_{w,r} * ywr_{w,r} + VWRC_{w,r} * FWR_{w,r}) + \right. \\
\left. \sum_s (FWSC_{w,s} * yws_{w,s} + VWSC_{w,s} * FWS_{w,s}) \right) \\
+ \sum_u \left(\sum_{u^*} (FUUC_{u,u^*} * yuu_{u,u^*} + VUUC_{u,u^*} * FUU_{u,u^*}) + \right. \\
\left. \sum_r (FURC_{u,r} * yur_{u,r} + VURC_{u,r} * FUR_{u,r}) + \right. \\
\left. \sum_s (FUSC_{u,s} * yus_{u,s} + VUSC_{u,s} * FUS_{u,s}) \right) \\
+ \sum_r \left(\sum_u (FRUC_{r,u} * yru_{r,u} + VRUC_{r,u} * FRU_{r,u}) + \right. \\
\left. \sum_{r^*} (FRRC_{r,r^*} * yrr_{r,r^*} + VRRC_{r,r^*} * FRR_{r,r^*}) + \right. \\
\left. \sum_s (FRSC_{r,s} * yrs_{r,s} + VRSC_{r,s} * FRS_{r,s}) + \right. \\
\left. FRC_r * yr_r + CCR_r * (FR)^{0,7} \right)
\end{aligned} \tag{37}$$

Custo de conexões:

$$FIJC_{ij} = 124,5 . d_{ij} , \quad \forall i \in \{W, U, R\}, j \in \{W, U, R, S\} \tag{38}$$

$$VIJC_{ij} = 1,001 . d_{ij} , \quad \forall i \in \{W, U, R\}, j \in \{W, U, R, S\} \tag{39}$$

Pode-se considerar, também, um sistema de pré-tratamento associado. Para tanto, tem-se uma segunda função objetivo:

$$consu = \sum_w \left(\sum_u FWU_{w,u} + \sum_r FWR_{w,r} \right) \tag{40}$$

Para a solução do modelo apresentado, o procedimento de *bound contraction* foi utilizado. A técnica foi proposta por Faria e Bagajewicz (2011) e baseia-se na contração dos limites das variáveis, quando aparecem termos bilineares nas restrições. O algoritmo para o procedimento *bound contraction* consiste em sucessivos passos, com a contração dos intervalos entre os valores mínimo e máximo de cada variável, garantindo limites cada vez menores para cada variável a cada passo, ou seja, calculando uma distância cada vez menor entre o limite superior e o limite inferior das variáveis envolvidas no problema até a sua finalização.

III. RESULTADOS

Um caso da literatura foi utilizado para testar a aplicabilidade do modelo desenvolvido e da técnica de otimização escolhida para a solução do problema. O problema foi originalmente apresentado por Yang *et. al* (2000), para uma indústria de papel e celulose, e considera a minimização do consumo de água fresca e do custo total anual. O problema é composto por uma fonte de água limpa, sete unidades consumidoras, um processo regenerativo e dois contaminantes. Um processo de regeneração foi utilizado, com coagulação-floculação e sedimentação, e os contaminantes foram sólidos suspensos totais (TSS) e demanda química de oxigênio (DQO) foram utilizados, conforme Delgado (2008). As unidades de água têm vazão fixa e os processos regenerativos são modelados com taxa de remoção. A Tabela 1 apresenta os dados limitantes para este estudo de caso.

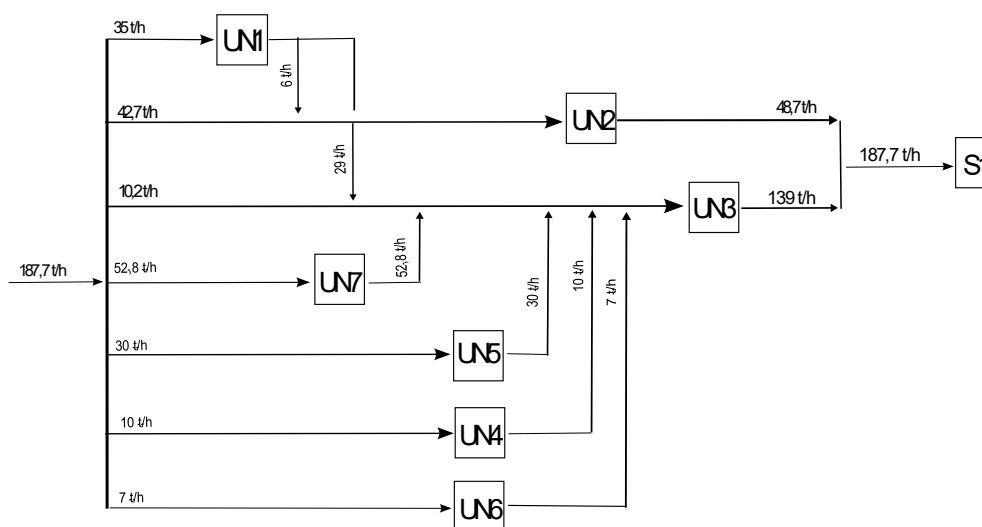
Tabela 1: Dados limitantes

Processos	Contaminantes	Vazão mássica (kg/h)	$C^{in,max}$ (ppm)	$C^{out,max}$ (ppm)
1	TSS	7000	0	200
	DQO	7000	0	200
2	TSS	22400	100	500
	DQO	28000	100	600
3	TSS	62550	200	650
	DQO	38920	220	500
4	TSS	2000	0	200
	DQO	2500	50	300
5	TSS	8750	50	300
	DQO	10500	50	350
6	TSS	1050	50	200
	DQO	1400	50	250
7	TSS	13200	50	300
	DQO	7920	50	200

Yang *et al.* (2000) minimizaram o consumo de água fresca no processo por meio de programação matemática e sem considerar estratégias de reuso ou regeneração. O consumo mínimo obtido pelos autores foi de 289,5 t/h. Para a configuração com reuso e sem processos de regenerativos, o consumo de água foi reduzido para 192,7 t/h, que corresponde a uma economia de 33,4% em relação à condição inicial da planta.

Aplicando-se o modelo desenvolvido no presente trabalho utilizando a técnica de *bound contraction*, a solução obtida para a rede convencional coincidiu com a apresentada por Yang *et al.* (2000). Na configuração de rede com reuso e sem regeneração, o consumo de água limpa foi de 187,7 t/h, com uma redução de 35,1% em relação ao valor inicial. O modelo foi codificado em GAMS (*General Algebraic Modeling System*) 43.4, em um computador com processador, Intel(R), CORE(TM) i7, de 3.6GHz de 8 GB de memória RAM. O tempo necessário para a obtenção da solução ótima global foi de 0,12 segundos, sendo o ótimo global encontrado na primeira iteração. A Figura 1 apresenta a rede ótima obtida no presente trabalho.

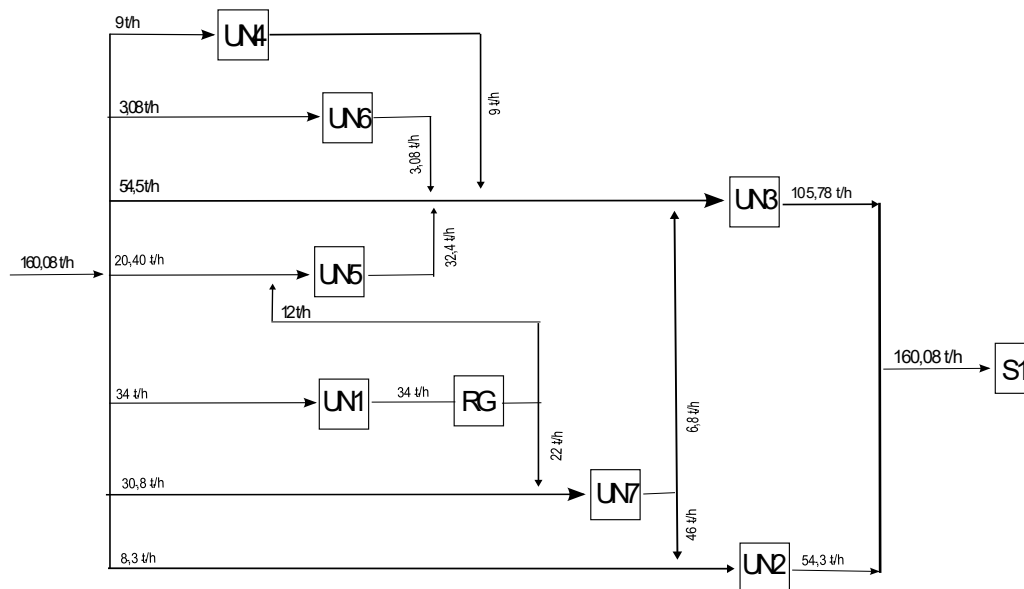
Figura 1: Rede ótima com reuso e sem regeneração



Considerou-se, também, a inclusão de um processo regenerativo, com coagulação-floculação e sedimentação, com uma taxa fixa de remoção de 75% para SST e de 85% para DQO. Foram adotados os limites de descarga de 120 ppm para SST e de 200 ppm

para DQO. Esse problema foi resolvido por Delgado (2008), utilizando o Diagrama de Fontes de Água e o consumo mínimo de água obtido para uma rede com reuso e com a adição dos processos regenerativos foi de 166,1 t/h. Destaca-se que Yang *et al.* (2000) não solucionaram o problema considerando a inserção de processos regenerativos. Aplicando a estratégia proposta no presente trabalho, obteve-se, para o mesmo problema, o resultado de 160,08 t/h. O algoritmo convergiu para o ótimo global na primeira iteração, com tempo computacional de 0,09 segundos. A rede ótima é apresentada na Figura 2.

Figura 2: Rede ótima com reuso e com regeneração



A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a minimização do consumo de água fresca.

Tabela 2: Resultados do consumo mínimo de água limpa

Vazões em t/h	Yang <i>et al.</i> (2000)	Delgado (2008)	Presente Trabalho
Sem reuso e sem regeneração	289,5	289,5	289,5
Com reuso e sem regeneração	192,7	190	187,7
Com reuso e com regeneração	----	166,1	160,08

Para o cálculo do custo total anual, os dados propostos por Delgado (2008) foram utilizados. O custo de água limpa foi fixado em 1,4 \$/t, com a rede operando anualmente por 8600h/ano. O custo operacional do processo de $OPN_r = 0,1321$ \$/ton e o custo fixo de capital tinha o valor de $CCR_r = 16.800$ \$/ton^{0,7}.

Para calcular os custos das conexões, as distâncias propostas por Faria e Bagajewicz (2011) foram usadas, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Distância entre os processos

$d_{i,j}(m)$	UN1	UN2	UN3	UN4	UN5	UN6	UN7	RG1	Descarga
FW	30	25	70	50	90	200	500	600	2000
UN1	0	30	80	150	400	90	150	200	1200
UN2	30	0	60	100	165	100	150	150	1000
UN3	80	60	0	50	75	120	90	350	800
UN4	150	100	50	0	150	250	170	400	650

UN5	400	165	75	150	0	300	120	200	300
UN6	90	100	120	250	300	0	125	80	250
UN7	150	150	90	170	120	125	0	35	100
RG1	200	150	350	400	200	80	35	0	100

Utilizando-se o modelo proposto no presente trabalho, obteve-se, para a rede com reuso e com regeneração o custo total anual de 1.701.064,5 \$/ano, enquanto que o valor publicado por Delgado (2008) foi de 1.813.076,7 \$/ano. A redução obtida foi de aproximadamente 6,2 %.

Tanto no caso do consumo mínimo como do mínimo custo total anual o modelo proposto no presente trabalho encontrou os valores ótimos globais, por ser a técnica de bound contraction uma técnica de otimização global. Provavelmente, os resultados obtidos pelos outros autores ficaram aprisionados em ótimos locais.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de otimização com formulação MINLP para minimizar o consumo de água fresca e do custo total anual em processos industriais de papel e celulose, considerando estratégias de reuso e regeneração. O modelo contém termos bilineares nas restrições e, para sua solução, a técnica de otimização global *bound contraction* foi utilizada.

Um caso de estudo da literatura foi utilizado para testar a metodologia proposta, com a incorporação de reuso de água e de processos regenerativos para a diminuição da demanda de água. A configuração de rede obtida considerando reuso e sem regeneração, teve um consumo de água fresca de 187,7 t/h, inferior aos resultados anteriormente publicados na literatura, o que representa uma redução de 35,1% em. A configuração de rede obtida quando foram considerados reuso e regeneração apresentou um consumo ótimo de 160,08 t/h, o que representa uma redução no consumo de 47,7% em relação aos trabalhos publicados na literatura. Para o cálculo do custo total anual a configuração de rede com reuso e com regeneração apresentou uma redução de aproximadamente 6,2% em relação ao resultado apresentado por Delgado (2008).

Portanto, pode-se concluir que a estratégia de *bound contraction* foi eficiente para as duas situações, minimização do consumo de água e minimização do custo total anual. Além disso, pode contribuir significativamente para práticas mais sustentáveis no contexto da gestão industrial relativa aos recursos hídricos.

V. REFERÊNCIAS

DELGADO, B. E. P. C. Síntese de sistemas de regeneração e tratamento final de efluentes. **Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímico - Universidade Federal do Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, 2008.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual** (2024). Disponível em: <<https://www.iba.org>>. Acesso em: 05/02/2026.

FARIA, D. C., BAGAJEWICZ, M. J., (2011). Novel bound contraction procedure for global optimization of bilinear MINLP problems with applications to water mangement problems. **Computers and Chemical Engineering**, v. 35, p. 446-455, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.04.010>.

MOREIRA, C. V. Análise da gestão de indicadores ambientais de uma empresa de papel e celulose, com ênfase em consumo de água e geração de efluentes (2020). **Monografia**

(Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais.

Yang, Y. H., Lou, H. H., Huang, Y. L. (2000) Synthesis of an optimal wastewater reuse network. **Waste Management**, 20, 311-319. doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00298-6.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processos 309026/2022-9 e 406544/2023-9.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.