

EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE COZIMENTO KRAFT EM DIGESTORES INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Alexandre Moreira dos Santos¹, Fernanda Maria Guedes Ramalho², Leandro Vitor Pavão¹, Caliane Bastos Borba Costa¹

¹UEM – Universidade Estadual de Maringá, PEQ – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Maringá, Brasil (pg406355@uem.br)

²Klabin SA, Telêmaco Borba, Brasil

Resumo: O cozimento Kraft é etapa central na produção industrial de polpa celulósica, influenciando rendimento, qualidade e eficiência do processo. Esta revisão analisou a evolução das tecnologias de cozimento em digestores industriais, comparando o processo convencional, MCC, *SuperBatch*, *Lo-Solids* e *Compact Cooking*. Os estudos indicam avanços no controle de álcali, impregnação, sólidos dissolvidos e temperatura, com ganhos em seletividade, rendimento e qualidade da polpa.

Palavras-chave: Cozimento Modificado; Rendimento; Viscosidade; Kraft; Digestores.

INTRODUÇÃO

A indústria de papel e celulose ocupa posição estratégica no cenário industrial e econômico mundial pela sua capacidade de converter biomassa lignocelulósica em produtos de alto valor agregado e ampla aplicação, como polpas celulósicas, papéis, embalagens e derivados da matriz florestal (FAO, 2022). Nos últimos anos, as pesquisas nesse setor se concentram no aumento da eficiência energética e produtiva, na redução do consumo de madeira e reagentes químicos e no desenvolvimento de rotas alinhadas à economia circular e à sustentabilidade industrial (IBÁ, 2023; Sharma e Basera, 2025).

Entre as rotas industriais de obtenção da polpa celulósica, o processo Kraft consolidou-se como a tecnologia química predominante devido à sua robustez operacional, elevada eficiência de deslignificação, produção de polpas que se destacam pelas propriedades mecânicas e possibilidade de recuperação dos químicos aplicados no processo (Sixta, 2006; Ek et al., 2009). Ele baseia-se na digestão dos cavacos de madeira em meio alcalino, utilizando licor branco, composto majoritariamente por hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, para solubilizar a lignina e separar as fibras celulósicas (Alén, 2011).

O digestor é o equipamento central do processo Kraft, encarregado da solubilização da lignina e manutenção das condições operacionais sua ocorrência (Sixta, 2006). Em escala industrial, digestores contínuos se destacam por sua capacidade produtiva e pelo sequenciamento do processo de cozimento em zonas distintas, como impregnação, aquecimento, cozimento, extração e lavagem, permitindo o controle do perfil de temperatura, tempo de residência e

composição química ao longo do equipamento (Gullichsen e Fogelholm, 1999).

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias de cozimento modificado passou a representar uma importante frente de inovação na indústria de celulose (Herschmiller, 1998). Essas tecnologias buscam aumentar a seletividade do processo por meio do controle do perfil alcalino e da disponibilidade de íons provenientes do licor branco, reduzir a concentração de lignina e sólidos dissolvidos no licor e manter condições operacionais menos agressivas, visando maior rendimento, menor degradação das fibras e melhores parâmetros físico-químicos de qualidade da polpa (Courchene, 1998).

Entre as tecnologias desenvolvidas para o cozimento Kraft modificado, o *Modified Continuous Cooking* (MCC) se destaca por ser uma das primeiras estudadas (Hakanen e Teder, 1997). O MCC contribuiu para consolidar princípios de seletividade que passaram a orientar tecnologias posteriores por conta de seu controle da concentração de álcali e a diminuição da concentração de lignina dissolvida nas etapas finais do cozimento, aumentando a preservação dos carboidratos e possibilitando alcançar maiores graus de deslignificação (Sixta, 2006).

Em relação ao cozimento em batelada, o *SuperBatch*, baseado no deslocamento de licores e no melhor aproveitamento das etapas de impregnação e aquecimento, se destaca pela menor formação de rejeitos e maior controle das condições reacionais (Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). Esse processo se destaca pelas propriedades mecânicas da polpa com o aumento do tempo de residência (Antes e Joutsimo, 2015b).



Tecnologias mais utilizadas atualmente, como *Lo-Solids* e *Compact Cooking*, ampliaram os princípios de cozimento contínuo modificado ao incorporar estratégias mais avançadas de controle químico, térmico e hidrodinâmico dos digestores (Ju, 2012). O *Lo-Solids* tem como fundamento principal a redução da concentração de sólidos dissolvidos durante o cozimento por meio de extrações múltiplas de licor concentrado e adições fracionadas de licor branco (Marcoccia et al., 1996a). O *Compact Cooking* prioriza impregnação eficiente dos cavacos em um vaso separado do cozimento, operando em menores temperaturas (Pikka e Andrade, 2015).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a evolução das tecnologias de cozimento Kraft em digestores industriais. A revisão enfatiza a comparação entre o cozimento convencional, o MCC, o *SuperBatch*, o *Lo-Solids* e o *Compact Cooking*, destacando fundamentos operacionais, vantagens, limitações e impactos sobre seletividade, rendimento, qualidade da polpa e eficiência industrial.

MATERIAL E MÉTODOS

Para condução do estudo, as buscas em publicações foram feitas nas bases de dados Science Direct, Scopus e Periódicos CAPES, utilizando os seguintes descritores: “cozimento Kraft”, “*continuous digester*”, “*modified Kraft cooking*”, “*pulp mill*” e “*modified Kraft cooking*”. Foram selecionados trabalhos que apresentassem relação direta com tecnologias de cozimento Kraft e digestores industriais contínuos e batelada. Não foram selecionadas publicações cujo foco principal estivesse restrito a etapas posteriores à polpação, como branqueamento, tratamento de efluentes e fabricação de papel.

A análise dos materiais selecionados foi realizada de forma qualitativa, considerando a relevância técnica das publicações, a contribuição para a compreensão da evolução histórica dos digestores e a relação entre cada tecnologia de cozimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção do trabalho tem como objetivo expor detalhadamente os conceitos do cozimento Kraft, das tecnologias de cozimento e digestores descritos pelas literaturas encontradas pela metodologia de busca adotada.

O cozimento Kraft convencional: fundamentos, vantagens e limitações

Em condições industriais, o cozimento Kraft é normalmente conduzido em temperaturas próximas de 150 a 170 °C, embora os valores específicos dependam da matéria-prima, número Kappa objetivo e da tecnologia do digestor empregada (Sixta, 2006). No licor branco, os principais agentes ativos são os

íons hidroxila e hidrossulfeto, formados a partir da dissociação dos compostos presentes no meio. Usualmente, são observadas no licor branco concentrações aproximadas de 2,5 mol/L de íons hidroxila e 0,5 mol/L de íons hidrossulfeto, além de menores teores de carbonatos, sulfatos, sulfitos e tiosulfatos (Ek et al., 2009).

Os íons hidroxila contribuem para a alcalinidade do sistema e para a solubilização dos fragmentos de lignina (Gierer, 1980). Os íons hidrossulfeto favorecem a seletividade do processo, acelerando as reações sobre a lignina e reduzindo a degradação dos carboidratos estruturais (Ek et al., 2009). Dessa forma, a eficiência do cozimento não depende apenas da remoção da lignina, mas também da preservação das fibras responsáveis pela qualidade da polpa (Sixta, 2006).

O número Kappa, um dos principais parâmetros de controle do cozimento Kraft, indica o teor de lignina residual presente na polpa após digestão (Rahman et al., 2020). Para polpas branqueáveis, ou seja, com maior grau de deslignificação, ele se situa entre 14 e 20 para folhosas e 25 e 30 para coníferas (Alén, 2011). Rendimentos típicos para esses dois tipos de madeira situam-se em torno de 50 a 53 % para folhosas e 46 a 49 % para coníferas, com variações associadas a diversidade da matéria-prima e condições operacionais (Ek et al., 2009).

Além do número Kappa, o Fator H consiste em outro parâmetro fundamental para o controle e otimização do cozimento Kraft. Ele é definido como um parâmetro cinético que combina as variáveis de tempo e temperatura de reação em um único índice, representando a severidade térmica do processo e a extensão teórica da deslignificação. Ao expressar a taxa de reação relativa, o Fator H permite ajustar o tempo de residência e o perfil de aquecimento no digestor para atingir o grau de deslignificação desejado de forma padronizada. No processo convencional, a faixa de variação do Fator H depende diretamente da densidade da madeira e do produto final, situando-se tipicamente entre 500 e 1200 para folhosas (como o eucalipto) e entre 1500 e 2500 para coníferas (como o pinus) (Ek et al., 2009).

Em relação a digestores industriais, o desempenho do cozimento é influenciado por variáveis como carga alcalina, temperatura, tempo de residência, relação licor/madeira, impregnação dos cavacos e concentração de sólidos dissolvidos no meio (Sixta, 2006). A impregnação dos cavacos é essencial para redução das heterogeneidades do cozimento, minimização de rejeitos e uniformização da polpa produzida (Bijok, 2024). Estudos recentes indicam que os digestores contínuos permanecem como foco de pesquisas de modelagem, controle avançado,



diagnóstico operacional e otimização do processo (Rahman et al., 2020).

O cozimento Kraft convencional consolidou-se industrialmente por sua robustez operacional, eficiência de deslignificação e capacidade de produzir polpas caracterizadas por boas propriedades físico-mecânicas (Alén, 2011). Apesar dessas vantagens, sua principal limitação está relacionada à seletividade da deslignificação, uma vez que a remoção da lignina ocorre simultaneamente a reações indesejadas de degradação da celulose e hemicelulose, sendo promovidas pela temperatura de cozimento (Gierer, 1980). Além disso, limitações de temperatura agressivas aos carboidratos, tempo de residência alto e alcalinidade elevada podem intensificar a perda de carboidratos estruturais na tentativa de redução do número Kappa diretamente no digestor (Sixta, 2006).

Segundo Larraín et al. (2020), a eficiência do cozimento contínuo é afetada pelo elevado tempo de residência dos cavacos, pelo movimento instável da coluna dos cavacos e pelas variações das propriedades da matéria-prima. Essas condições implicam na aferição da qualidade final da polpa feita apenas na saída do digestor, dificultando ações corretivas e antecipadas durante o cozimento.

A impregnação insuficiente dos cavacos representa outra limitação relevante do cozimento convencional, gerando gradientes locais de concentração química e severidade reacional (Bijok, 2024). Essas heterogeneidades favorecem a formação de rejeitos, ampliam a variabilidade do número Kappa e reduzem a uniformidade da polpa produzida (Rahman et al., 2020).

O acúmulo de lignina dissolvida no licor também interfere no desempenho do cozimento Kraft, reduzindo a seletividade da deslignificação, prejudicando a viscosidade da polpa e afetando negativamente a branqueabilidade em etapas posteriores (Marcoccia et al., 1996a). Esse efeito torna-se mais crítico nas fases finais do cozimento, quando a lignina residual apresenta maior resistência à remoção e a degradação dos carboidratos passa a competir mais intensamente com a deslignificação (Gierer, 1980).

Além dos aspectos químicos, o cozimento convencional necessita do equilíbrio entre temperatura, tempo de residência, carga alcalina, sulfidez e relação licor/madeira (Sixta, 2006). No estudo de Larraín et al. (2020), a otimização de um digestor contínuo a partir dessas variáveis listadas e temperaturas operacionais de 149 a 155 °C, permitiu a redução do desvio padrão do número Kappa em até 1,4 unidade e indicou que o aumento de uma unidade do número Kappa pode representar ganho de rendimento equivalente a 0,2 a 0,4 %, reforçando a importância do controle operacional desse parâmetro.

Dessa forma, as limitações e dificuldades listadas do cozimento Kraft convencional, relacionadas principalmente à preservação dos carboidratos, motivaram o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de controlar melhor o perfil alcalino e de sólidos dissolvidos (Courchene, 1998). Nesse contexto, tecnologias como MCC, *SuperBatch*, *Lo-Solids* e *Compact Cooking* surgem como alternativas voltadas ao aumento da seletividade e rendimento do processo produtivo de polpas celulósicas (Antes e Joutsimo, 2015a).

O Cozimento Contínuo Modificado (MCC)

O *Modified Continuous Cooking* (MCC) representa um dos primeiros marcos industriais do cozimento Kraft contínuo modificado, tendo sido introduzido na década de 1980 para reduzir limitações do cozimento contínuo convencional (Hakanen e Teder, 1997). No cozimento contínuo convencional, a concentração de álcali efetivo tende a ser elevada no início do processo e reduzida nas etapas finais, o que aumenta a exposição inicial dos carboidratos a condições alcalinas mais severas. O MCC modifica essa lógica ao nivelar o perfil de álcali efetivo ao longo do digestor, reduzindo a carga alcalina inicial e promovendo adições posteriores de licor branco durante o cozimento (Dillner et al., 1990). Essa redistribuição da carga alcalina busca aumentar a seletividade da deslignificação e reduzir a degradação de celulose e hemiceluloses nas etapas iniciais do processo (Courchene, 1998).

Do ponto de vista construtivo e operacional, o MCC foi implementado por modificações em digestores contínuos Kamyr de dois vasos, permitindo a introdução de licor branco em diferentes pontos do sistema e a condução da fase final do cozimento em fluxo contracorrente. Nessa configuração, parte do licor carregado com lignina dissolvida é removida, enquanto químicos mais frescos são adicionados em regiões posteriores do digestor (Dillner et al., 1990). A fase final contracorrente reduz a concentração de lignina dissolvida no licor próximo ao término do cozimento, favorecendo a difusão dos produtos de reação para fora dos cavacos e minimizando a precipitação de lignina sobre as fibras (Courchene, 1998). Essa configuração diferencia o MCC do cozimento contínuo convencional, no qual a parte final do digestor pode operar com maior concentração de compostos orgânicos dissolvidos e menor disponibilidade efetiva de álcali (Dillner et al., 1990).

Os resultados reportados por Dillner et al., (1990) na indicam que polpas produzidas por MCC podem apresentar viscosidade intrínseca aproximadamente 100 unidades (dm³/kg) superior pelo método SCAN em comparação a polpas convencionais obtidas no mesmo número Kappa. Essa diferença de viscosidade indica maior preservação das cadeias de celulose



durante o cozimento modificado. A maior viscosidade também permite reduzir o número Kappa em cerca de 5 a 6 unidades sem perda equivalente do potencial de resistência da polpa. Essa característica tornou o MCC adequado para integração com etapas posteriores de deslignificação com oxigênio, permitindo a produção de polpas com menor teor de lignina antes do branqueamento.

A adoção industrial do MCC foi significativa no período de consolidação das tecnologias de cozimento modificado. Hakanen e Teder (1997) relataram que o MCC já estava estabelecido industrialmente em pelo menos 35 digestores distribuídos em oito países naquela época. Estudos de modelagem também posicionam o MCC como uma tecnologia intermediária na evolução dos digestores contínuos modificados. De acordo com Miyanishi (2000), a comparação simulada entre tecnologias em digestores de dois vasos indicou que o MCC é superior apenas ao cozimento contínuo convencional, e inferior às tecnologias posteriormente desenvolvidas.

Apesar dos ganhos obtidos, a extensão da deslignificação modificada em MCC para números Kappa muito baixos pode intensificar perdas de hemiceluloses na fase final contracorrente. Segundo Hakanen e Teder (1997), quando a deslignificação é estendida para faixas de Kappa entre 18 e 20, pode ocorrer perda de hemiceluloses junto à remoção adicional de lignina. Essa perda reduz o rendimento da polpa branqueada e pode alterar seu refino, pois as hemiceluloses contribuem para o desenvolvimento de propriedades mecânicas durante a formação do produto final.

O SuperBatch

O *SuperBatch* é uma tecnologia de cozimento Kraft batelada modificada baseada no deslocamento sequencial de licores, na recuperação térmica de correntes quentes e na aplicação dos princípios de cozimento modificado em sistemas descontínuos (Uusitalo e Svedman, 1999; Hakamaki e Kovasin, 1991). O processo foi desenvolvido para reduzir a desvantagem energética dos digestores batelada em relação aos sistemas contínuos, preservando a flexibilidade operacional característica dos processos descontínuos (Seino, 1993). A sequência operacional do *SuperBatch* envolve carregamento dos cavacos, impregnação com licor negro morno, tratamento com licor negro quente, injeção de licor branco quente, aquecimento/cozimento, deslocamento final e descarga do digestor (Weckroth e Hiljanen, 1996; Olm et al., 2000).

Na etapa de impregnação, o licor negro morno é aplicado em temperaturas próximas de 80 a 90 °C, condição em que as reações de cozimento ainda não se iniciam de forma significativa (Weckroth e Hiljanen, 1996; Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). Na etapa

seguinte, o licor negro quente eleva a temperatura dos cavacos para cerca de 150 a 160 °C e permite o aproveitamento de calor e de compostos químicos residuais provenientes de cozimentos anteriores (Uusitalo e Svedman, 1999; Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). A injeção posterior de licor branco quente completa a carga alcalina definida para o cozimento, enquanto o deslocamento final com filtrado resfria o conteúdo do digestor e interrompe as reações antes da descarga (Olm et al., 2000; Vasconcelos e Silva Júnior, 2008).

No estudo conduzido por Vasconcelos e Silva Júnior (2008), o processo *SuperBatch* foi avaliado em comparação ao cozimento Kraft convencional para produção de polpas não branqueáveis e branqueáveis de *Pinus taeda*. Para polpas não branqueáveis, o *SuperBatch* utilizou 22,0% de álcali ativo, fator H de 1037, temperatura máxima de 165 °C e relação licor/madeira de 5:1, enquanto o processo convencional operou com fator H de 2300 e temperatura máxima de 170 °C. Para polpas branqueáveis, o *SuperBatch* utilizou 27,0% de álcali ativo, fator H de 1473 e temperatura máxima de 170 °C, mantendo relação licor/madeira.

Os resultados apresentados por Vasconcelos e Silva Júnior (2008) indicaram diferenças expressivas entre o *SuperBatch* e o cozimento convencional na produção de polpas não branqueáveis sem antraquinona. O *SuperBatch* apresentou número Kappa de 56,80, rendimento bruto de 57,79%, rendimento depurado de 52,31% e teor de rejeitos de 5,48%. No processo convencional, os valores correspondentes foram número Kappa de 56,20, rendimento bruto de 55,38%, rendimento depurado de 43,34% e teor de rejeitos de 12,05%. Em nível semelhante de deslignificação, esses dados representam redução superior a 50% no teor de rejeitos e aumento de aproximadamente nove pontos percentuais no rendimento depurado para o *SuperBatch* em relação ao cozimento convencional.

Nesse mesmo estudo, a análise da evolução da deslignificação mostrou que praticamente não houve reação significativa com a lignina durante a etapa inicial de impregnação do *SuperBatch*. Durante a etapa de licor negro quente, aproximadamente 25 a 30% da lignina foi dissolvida, enquanto a fase principal de cozimento respondeu por cerca de 50 a 60% da remoção da lignina, dependendo do nível de deslignificação avaliado. No cozimento convencional, a fase inicial remove cerca de 20 a 25% da lignina, enquanto a fase principal concentra a maior parte da deslignificação, porém com maior geração de rejeitos em polpas de alto número Kappa (Kleppe, 1970; Vasconcelos e Silva Júnior, 2008).

O perfil químico do *SuperBatch* também se diferencia do cozimento convencional pela aplicação fracionada



da carga alcalina e pela elevada sulfidez dos licores nas etapas iniciais (Herschmiller, 1998; Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). Para polpas não branqueáveis, foram observados valores de sulfidez residual de 64,6% na impregnação, 78,6% na etapa de licor negro quente e 41,3% na etapa de cozimento (Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). No processo convencional, a sulfidez residual ao final do cozimento foi de 35,1%, valor inferior ao observado nas etapas iniciais do *SuperBatch* (Vasconcelos e Silva Júnior, 2008). Esse comportamento é coerente com os princípios do cozimento modificado, nos quais se busca maior disponibilidade de sulfeto nas fases iniciais e menor severidade alcalina no início do processo (Herschmiller, 1998; Courchene, 1998).

Ainda no estudo de Vasconcelos e Silva Júnior (2008), a adição de antraquinona ao *SuperBatch* reduziu o número Kappa da polpa não branqueável de 56,80 para 52,75, sem alteração das condições iniciais de cozimento. No processo convencional, o uso de antraquinona permitiu reduzir a carga inicial de álcali ativo em 0,5 ponto percentual, mantendo o número Kappa em patamar semelhante ao processo sem aditivo. Para polpas branqueáveis, o *SuperBatch* apresentou maior seletividade em comparação ao processo convencional, enquanto a antraquinona não apresentou efeito significativo nesse nível de deslignificação, provavelmente em função da maior carga alcalina aplicada.

Em estudo comparativo com *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens*, Antes e Joutsimo (2015a) avaliaram *SuperBatch*, *Lo-Solids* e *Compact Cooking* em polpas produzidas no mesmo nível de número Kappa de $17 \pm 0,5$. Os autores observaram que as tecnologias modificadas influenciaram propriedades como viscosidade, teor de lignina, composição de carboidratos, extrativos e ácidos hexenurônicos (HexA), mesmo quando comparadas em um mesmo grau de deslignificação. No mesmo estudo, o *Compact Cooking* apresentou rendimento e viscosidade ligeiramente superiores aos demais processos modificados avaliados, enquanto o *SuperBatch* permaneceu como referência importante entre os sistemas batelada modificados.

O *Lo-Solids*

O Cozimento de Baixos Sólidos, conhecido comercialmente como *Lo-Solids*, é uma tecnologia de cozimento Kraft contínuo modificada desenvolvida para reduzir a concentração de sólidos dissolvidos no licor durante as fases principal e final da deslignificação (Marcoccia et al., 1996a). O termo *Lo-Solids* está associado ao desenvolvimento comercial e patenteado de processos de polpação com baixa concentração de sólidos dissolvidos, nos quais licores com elevada concentração de material orgânico dissolvido são extraídos e substituídos por correntes

com menor teor de sólidos ao longo do cozimento (Marcoccia et al., 1996b; Marcoccia et al., 1996c). A literatura técnica descreve o *Lo-Solids* como uma tecnologia associada originalmente à Ahlstrom Kamy, enquanto as patentes relacionadas ao processo tratam do controle de sólidos dissolvidos como estratégia para melhorar resistência, viscosidade e branqueabilidade da polpa (Marcoccia et al., 1996a; Marcoccia et al., 1996b).

O princípio tecnológico do *Lo-Solids* está relacionado ao efeito dos sólidos dissolvidos da madeira sobre o desempenho do cozimento Kraft (Marcoccia et al., 1996a). Esses sólidos incluem lignina, fragmentos de celulose e hemiceluloses, extrativos, metais e minerais removidos da madeira durante a polpação. Diferentemente do MCC, cujo foco principal era reduzir a concentração de lignina dissolvida nas etapas finais do cozimento, o *Lo-Solids* busca reduzir a concentração total de sólidos dissolvidos durante a deslignificação principal e final. Dessa forma, o processo atua simultaneamente sobre o perfil alcalino, a concentração de compostos orgânicos dissolvidos e a composição do licor de cozimento (Marcoccia et al., 1996a).

A configuração operacional do *Lo-Solids* é baseada em múltiplas extrações de licor negro ao longo do digestor, associadas a adições fracionadas de licor branco e filtrados de lavagem em diferentes regiões do equipamento (Marcoccia et al., 1996b). As extrações removem parte do licor carregado com sólidos dissolvidos, enquanto as adições de licor e filtrado diluem o meio reacional e auxiliam na manutenção de concentrações químicas mais uniformes ao longo do vaso de cozimento. Em aplicações comerciais iniciais, Marcoccia et al. (1996a) relataram redução de até 30% na concentração de sólidos dissolvidos no licor, além de aumento de viscosidade, melhoria da resistência da polpa, maior capacidade de extração do digestor, melhoria da lavagem interna e redução da demanda de químicos no branqueamento. O processo também foi descrito como aplicável à modernização de digestores existentes, pois as modificações envolvem principalmente alterações nos pontos de extração e de adição de licores. Nas aplicações relatadas, os benefícios do cozimento modificado foram obtidos inclusive em digestores com pouca ou nenhuma zona de lavagem ascendente. As alterações requeridas para conversão de digestores existentes ao conceito *Lo-Solids* foram descritas como relativamente pequenas e sem prejuízo à capacidade de produção, dependendo da configuração original do digestor.

Shin e Stromberg (2003) avaliaram o impacto de diferentes condições de cozimento sobre rendimento e propriedades da polpa em sistemas baseados em múltiplas adições de licor branco e múltiplas extrações de licor negro. Os autores observaram que o rendimento de celulose apresentou correlação com o



rendimento total da polpa e foi significativamente afetado pelo perfil de distribuição do álcali. A aplicação de maior carga alcalina na etapa de impregnação apresentou o efeito mais negativo sobre o rendimento de celulose, enquanto a variação do perfil alcalino não apresentou diferença significativa sobre o rendimento de xilanas. No mesmo estudo, a temperatura de cozimento não alterou o rendimento e o teor de ácidos HexA em um mesmo número Kappa, mas temperaturas mais elevadas resultaram em menor viscosidade da polpa.

No estudo conduzido por Gomide et al. (2007), o cozimento *Lo-Solids* de madeira de eucalipto foi avaliado em duplicata para obtenção de polpas com número Kappa de $16 \pm 0,5$. A deslignificação atingiu 97%, distribuída em cinco fases, sendo que a deslignificação principal foi composta por três etapas distintas. Ao final do cozimento, foram removidos 14,2% da celulose e 53,9% das hemiceluloses. Na fase final do cozimento, os autores observaram queda de viscosidade de 31,8 cP, mesmo com perda de rendimento de apenas 1% e redução de 5,5 unidades no número Kappa. Adicionalmente, a concentração de sólidos e de álcali no licor permaneceu relativamente constante ao longo do cozimento *Lo-Solids*. A remoção de lignina durante a impregnação apresentou maior participação de unidades guaiaxil, enquanto a lignina removida ao longo da deslignificação principal tornou-se progressivamente mais rica em unidades siringil. A formação de HexA ocorreu rapidamente na zona de impregnação, apresentou redução em parte da zona superior de cozimento e voltou a aumentar até o final do processo. Esse comportamento é compatível com a discussão de Correa et al. (2023), que afirma que o número Kappa em polpas de folhosas é influenciado não apenas pela lignina residual, mas também pela contribuição dos HexA.

Silva Júnior e McDonough (2002) avaliaram o efeito do ritmo de produção em cozimentos *Lo-Solids* de eucalipto, considerando três condições operacionais: abaixo da capacidade nominal, na capacidade nominal e acima da capacidade nominal do digestor. As variações de produção foram simuladas por mudanças nos tempos de impregnação e cozimento, mantendo-se o fator H constante por ajuste de temperatura e carga alcalina. Os resultados mostraram que o aumento do ritmo de produção reduziu a seletividade do processo, elevou o número Kappa associado à lignina, diminuiu a viscosidade da polpa e aumentou o consumo de cloro ativo total para atingir elevados níveis de alvura na etapa do branqueamento, posterior ao cozimento. A adição de antraquinona apresentou efeito positivo na redução do número Kappa e no aumento de rendimento.

Bassa et al. (2007) avaliaram misturas de cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* no processo *Lo-Solids*, utilizando proporções de

10 a 50% de *Pinus taeda*. O aumento da proporção de *Pinus taeda* foi associado à redução do rendimento bruto, rendimento depurado, viscosidade, teor de HexA, solubilidade em NaOH 5%, número de fibras por grama, drenabilidade, índice de tração e índice de estouro. Em contrapartida, foram observados aumentos no teor de lignina total na polpa, comprimento e largura das fibras, *coarseness*, índice de rasgo e consumo específico de madeira. A adição de 10% de *Pinus taeda* ao eucalipto proporcionou incremento de até 23,9% no índice de rasgo, mantendo rendimento próximo de 50%.

Santos et al. (2015) avaliaram o efeito do uso de cavacos de eucalipto submetidos à lixiviação ácida no processo *Lo-Solids*. O pré-tratamento reduziu os teores de metais de transição e elementos não processuais na madeira e nas polpas produzidas. Os autores reportaram redução da carga de licor branco, aumento de rendimento, aumento da viscosidade da polpa e elevação do poder calorífico do licor negro. Os teores de carboidratos e outros constituintes da madeira e da polpa não foram afetados de forma significativa pelo pré-tratamento ácido.

Gomide et al. (2011) avaliaram a produção de polpa Kraft de eucalipto em nível técnico-econômico ótimo utilizando cozimentos *Lo-Solids* em números Kappa mais elevados, entre 20 e 25, com e sem mistura de antraquinona e surfactante. O cozimento em Kappa 22 apresentou maior ganho econômico, com incremento de R\$10,47 por tonelada de polpa seca ao ar (R\$/tAD) para polpa K22 sem aditivos e R\$12,75/tAD para polpa K22AQ. A carga alcalina foi reduzida em 4,0% para K22 e 3,6% para K22AQ, enquanto a viscosidade aumentou 3,2 cP para K22 e 3,8 cP para K22AQ em relação à referência. O aumento do número Kappa para 22 também foi associado à melhoria de propriedades físico-mecânicas, como módulo de elasticidade, resistência ao ar, índice de estouro e índice de tração, quando avaliadas em função da energia de refino.

Em avaliação técnico-econômica recente, Wenaël et al. (2025) compararam a produção de polpa Kraft por *Compact Cooking* e *Lo-Solids* considerando custos variáveis de madeira, químicos e utilidades. A margem de lucro estimada foi de aproximadamente 148 dólares por tonelada seca ao ar (USD/ADt) para *Compact Cooking* e 189 USD/ADt para *Lo-Solids*. A comparação foi conduzida com base nas premissas econômicas adotadas pelos autores e contribui para a discussão recente sobre desempenho industrial e viabilidade das tecnologias modernas de cozimento contínuo.

O Compact Cooking

O Cozimento Compactado, conhecido comercialmente como *Compact Cooking*, é uma tecnologia de cozimento Kraft contínuo modificada



desenvolvida com foco na simplificação do sistema de cozimento, na melhoria da impregnação dos cavacos e na redução de custos operacionais em linhas de fibra modernas (Ju, 2009). O lançamento comercial do *Compact Cooking* ocorreu em 1997, enquanto a segunda geração, denominada *Compact Cooking G2*, foi lançada em 2003, com características associadas ao baixo consumo de vapor, baixo teor de rejeitos e elevado rendimento de polpação (Domingues et al., 2019). A tecnologia foi desenvolvida para aplicação em novas linhas de fibra, aumento de capacidade de sistemas existentes e modernização de plantas com objetivos de melhoria de rendimento, branqueabilidade, qualidade da polpa, consumo energético e carga ambiental (Ju, 2009).

O *Compact Cooking G2* deriva da evolução dos conceitos de cozimento Kraft modificado, mas apresenta uma configuração mais simplificada em relação a tecnologias contínuas anteriores. Enquanto tecnologias como *Modified Continuous Cooking*, *Isothermal Cooking* e *Black Liquor Impregnation* foram associadas aos princípios desenvolvidos na década de 1980, o *Compact Cooking G1* e o *Compact Cooking G2* foram vinculados à revisão desses princípios ocorrida na década de 1990 (Ju, 2012). Essa evolução incorporou a operação com menores temperaturas, maior presença de licor negro nas etapas iniciais, aumento da concentração de íons hidrossulfeto e controle do perfil alcalino para reduzir a degradação dos carboidratos durante o cozimento.

Do ponto de vista operacional, o *Compact Cooking G2* combina impregnação eficiente dos cavacos, reciclo de licor, integração térmica e distribuição controlada de químicos ao longo do sistema (Ju, 2009). A etapa de impregnação é conduzida antes da região principal de cozimento, permitindo maior tempo de contato entre cavacos e licor em condições menos severas de temperatura (Domingues et al., 2019). Essa configuração favorece a penetração do licor nos cavacos antes da elevação térmica principal, reduzindo heterogeneidades de cozimento e contribuindo para menor formação de rejeitos (Ju, 2009; Domingues et al., 2019).

A química do *Compact Cooking G2* envolve a recirculação de licor negro para as etapas de impregnação e cozimento, aumentando a disponibilidade de íons hidrossulfeto nas fases iniciais do processo. A maior disponibilidade de hidrossulfeto no início da deslignificação favorece reações sobre a lignina, enquanto o controle da concentração de hidroxila busca evitar picos alcalinos associados à degradação de celulose e hemiceluloses (Ju, 2012). O sistema também permite ajustar a relação licor/madeira ao longo do digestor, característica associada ao controle do perfil químico e hidrodinâmico conforme a matéria-prima processada e o produto desejado (Domingues et al., 2019).

Em estudo de Antes e Joutsimo (2015a), o *Compact Cooking* apresentou rendimento de cozimento e viscosidade ligeiramente superiores aos demais processos modificados avaliados. O mesmo estudo mostrou que *Eucalyptus globulus*, com relação siringil/guaiacil (S/G) de 4,7, exigiu menor fator H que *Eucalyptus nitens*, cuja relação S/G foi de 3,5. Esses resultados associam parte do desempenho observado à composição da lignina da madeira, além da configuração tecnológica de cozimento.

Antes e Joutsimo (2015b) avaliaram *SuperBatch*, *Compact Cooking* e *Lo-Solids* em relação à superfície da fibra e às propriedades técnicas de papéis produzidos com polpas branqueadas de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens*. As polpas de *Eucalyptus globulus* apresentaram maior rendimento depurado e maior alvura que as de *Eucalyptus nitens*, enquanto todas as amostras consumiram quantidades semelhantes de dióxido de cloro (ClO_2) para atingir alvura de 90% ISO. O estudo não observou diferenças relevantes de refinabilidade entre os métodos de cozimento modificados, enquanto as diferenças entre espécies tiveram maior influência sobre propriedades como índice de tração, volume específico e retenção de água.

Saavedra (2016) desenvolveu uma abordagem de otimização baseada em modelo para uma etapa industrial de digestão *Compact Cooking G2*. O autor descreveu o sistema como altamente não linear devido ao reciclo de licor e à integração térmica, fatores que dificultam otimizações baseadas apenas em tentativa e erro operacional. O modelo dinâmico foi desenvolvido em Matlab/Simulink com base em cinética de Purdue e modelos de compactação de leito de cavacos, sendo validado com 200 horas de dados industriais. A simulação apresentou boa concordância para álcali residual nos licores, sólidos do licor negro fraco e número Kappa na linha de descarga, embora o número Kappa simulado tenha apresentado maior sensibilidade a flutuações de temperatura do que o sinal industrial.

A otimização proposta por Saavedra (2016) utilizou um cenário de estado estacionário da planta para avaliar ganhos econômicos associados ao ajuste de pontos operacionais do *Compact Cooking G2*. Os resultados indicaram potencial de aumento de lucro ou redução de custos variáveis de pelo menos 2 dólares por tonelada seca ao ar (USD/ADt). Para uma fábrica moderna. Esse valor foi associado a benefício anual estimado entre 1 e 2 milhões de dólares, dependendo da taxa de produção e da disponibilidade operacional. O estudo também indicou que a variabilidade do número Kappa na linha de descarga pode ser explicada por dinâmicas de processo em múltiplas escalas de tempo.



Blonski et al. (2018a) avaliaram distúrbios de compactação de cavacos em um digestor contínuo *Compact Cooking* G2 instalado em uma planta de eucalipto. O digestor analisado possuía 69 m de altura, 12,5 m de diâmetro e capacidade de produção de 5550 toneladas secas ao ar por dia (tAD/d) de polpa de eucalipto. Os autores observaram que distúrbios no grau de compactação e instabilidades no movimento hidráulico da coluna de cavacos alteram o tempo de retenção, afetando produção, qualidade e uniformidade da polpa. O estudo propôs um Indicador de Prisão de Coluna para agrupar variáveis de processo relacionadas à retenção da coluna de cavacos e antecipar decisões operacionais durante instabilidades.

Em outro estudo industrial, Blonski et al. (2018b) avaliaram o efeito de diferentes estratégias de controle de nível de cavacos na estabilidade de um digestor *Compact Cooking* G2. O estudo comparou o controle de nível por variação do fluxo de descarga com o controle por variação na alimentação de cavacos, atuando no fluxo de transferência para o digestor. A mudança de estratégia de controle resultou em menor variação do fluxo de descarga e do nível de cavacos, redução das variações no tempo de residência, menor variabilidade do número Kappa e dos residuais de álcali, menor variação da consistência de descarga e da alvura da polpa. Os autores também indicaram potencial de redução no consumo de cloro ativo total no branqueamento em função do maior controle operacional da linha de cozimento.

Domingues et al. (2019) apresentaram uma revisão e atualização da tecnologia *Compact Cooking* G2 após 15 anos de aplicação comercial. Os autores destacaram a atualização denominada *RadialWash Duo*, que incorpora aspectos da lavagem *Hi-Heat* ao digestor *Compact Cooking* G2. A instalação industrial desse conceito foi associada à redução da demanda química de oxigênio (DQO) e ao aumento da alvura na descarga do digestor. Operacionalmente, essa atualização resultou em redução de 20% no consumo de ClO_2 na planta de branqueamento, sem aumento do consumo de vapor e álcali na planta de cozimento.

A atualização *RadialWash Duo* também foi apresentada como alternativa para melhorar a remoção de compostos dissolvidos ainda dentro do sistema de cozimento, antes da entrada da polpa nas etapas posteriores da linha de fibras (Domingues et al., 2019). A redução de DQO na descarga do digestor foi associada à melhoria da lavagem interna e à menor carga orgânica direcionada às etapas seguintes. O aumento de alvura na descarga, combinado à redução de consumo de ClO_2 , indica que ajustes na lavagem e na circulação interna do digestor podem afetar diretamente o desempenho químico da etapa de branqueamento.

CONCLUSÃO

A revisão da literatura permitiu reunir fundamentos, dados operacionais e resultados reportados sobre a evolução das tecnologias de cozimento Kraft em digestores industriais, atendendo ao objetivo proposto de levantar e discutir os conceitos associados ao cozimento convencional, MCC, *SuperBatch*, *Lo-Solids* e *Compact Cooking*. O cozimento Kraft convencional permanece como base industrial do processo, porém apresenta limitações relacionadas à seletividade da deslignificação, à variabilidade do número Kappa, à formação de rejeitos e à degradação de carboidratos quando submetido a condições mais severas de temperatura, tempo e alcalinidade.

As tecnologias modificadas analisadas apresentam estratégias distintas para superar essas limitações. O MCC atua principalmente na redistribuição da carga alcalina e na redução da concentração de lignina dissolvida nas etapas finais do digestor, enquanto o *SuperBatch* se diferencia pelo deslocamento sequencial de licores, maior controle da impregnação e reaproveitamento térmico em sistemas batelada. O *Lo-Solids* amplia o controle do meio reacional ao reduzir a concentração de sólidos dissolvidos durante a deslignificação, e o *Compact Cooking* associa impregnação eficiente, reciclo de licor, controle térmico e simplificação operacional em sistemas contínuos modernos.

Os resultados levantados na literatura indicam que os ganhos obtidos por essas tecnologias estão associados ao aumento da seletividade, à redução de rejeitos, à maior preservação da viscosidade, ao aumento do rendimento depurado, à melhoria da estabilidade operacional e à redução de consumo químico ou energético em determinadas condições. Entretanto, os efeitos observados dependem da matéria-prima, da relaçãoiringil/guaiacil da lignina, da formação de ácidos HexA, do perfil de álcali e sulfidez, da concentração de sólidos dissolvidos, do ritmo de produção e da estabilidade da coluna de cavacos no digestor.

Conclui-se que a evolução das tecnologias de cozimento Kraft não ocorreu pela substituição isolada de uma configuração por outra, mas pelo aperfeiçoamento progressivo do controle químico, térmico, hidrodinâmico e operacional do digestor. Dessa forma, MCC, *SuperBatch*, *Lo-Solids* e *Compact Cooking* representam diferentes respostas tecnológicas ao mesmo desafio central do processo Kraft: remover lignina de forma eficiente, preservando carboidratos e mantendo rendimento, qualidade da polpa e estabilidade industrial.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível



Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, bem como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, processo 307705/2025-0.

REFERÊNCIAS

- ALÉN, R. (Ed.). Biorefining of forest resources. Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2011.
- ANTES, R.; JOUTSIMO, O. P. Effect of modified cooking on chemical composition of pulps from *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *BioResources*, v. 10, n. 1, p. 210-226, 2015a.
- ANTES, R.; JOUTSIMO, O. P. Fiber surface and paper technical properties of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* pulps after modified cooking and bleaching. *BioResources*, v. 10, n. 1, p. 1599-1616, 2015b.
- BASSA, A. G. M. C.; SILVA JÚNIOR, F. G.; SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 75, p. 19-29, 2007.
- BIJOK, N. Modelling and simulation of biorefinery processes: case study: Kraft pulping process. 2024. 73 f. Doctoral Thesis - School of Chemical Engineering, Aalto University, Espoo, 2024.
- BLONSKI, M. E. D.; MOURA, G. F.; ARAÚJO, C. G. L.; SANTOS, C. V. C. Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em um digestor contínuo Compact Cooking G2. *O Papel*, v. 79, n. 12, p. 87-92, dez. 2018a.
- BLONSKI, M. E. D.; SANTOS, C. V. C.; MOURA, G. F.; SANTOS, N. M. P. E. Influência do controle de nível de cavacos na estabilidade do digestor. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL; CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA EM CELULOSE E PAPEL, 51., 2018, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABTCP/RIADICYP, 2018b. CORREA, I. B.; SOUZA JR., M. B.; SECCHI, A. R. On the modeling of continuous kraft pulp digesters: inclusion of wood characteristics. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 196, p. 711-724, 2023. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.07.012.
- COURCHENE, C. E. The tried, the true and the new - getting more pulp from chips modifications to the kraft process for increased yield. In: Breaking the Pulp Yield Barrier Symposium. Atlanta: TAPPI, p. 11-20, 1998.
- DILLNER, B.; LARSSON, L. O.; TIBBLING, P. Nonchlorine bleaching of pulp produced by the modified continuous cooking process. *TAPPI Journal*, 1990.
- DOMINGUES, A.; BIASOTTO, R.; FONSECA, C.; RODRIGUES, D. Revisão e atualização da tecnologia Compact Cooking. *O Papel*, v. 80, n. 8, p. 83-90, 2019.
- EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. Pulp and paper chemistry and technology: volume 2: pulping chemistry and technology. Berlin: Walter de Gruyter, 2009.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Pulp and paper: forest product statistics. Rome: FAO, 2022.
- GIERER, J. Chemical aspects of kraft pulping. *Wood Science and Technology*, v. 14, n. 4, p. 241-266, 1980.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; ALMEIDA, D. P. Kraft pulping of eucalyptus to the optimum technical and economical level. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON EUCALYPTUS KRAFT PULP, 5., 2011, Porto Seguro. Proceedings [...]. Porto Seguro, 2011.
- GOMIDE, J. L.; PIMENTA, L. R.; COLODETTE, J. L.; SHIN, N. H. Lo-Solids kraft pulping of eucalyptus wood. In: TAPPI ENGINEERING, PULPING AND ENVIRONMENTAL CONFERENCE, 2007. Proceedings [...]. TAPPI Press, 2007.
- GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. J. Chemical pulping. Jyväskylä: Gummerus Printing, 1999.
- HAKAMAKI, H.; KOVASIN, K. Super batch cooking: a modern way to improve pulp quality and reduce environmental load. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24., 1991. São Paulo, p. 179-192, 1991.
- HAKANEN, A.; TEDER, A. Modified kraft cooking with polysulfide: yield, viscosity, and physical properties. *TAPPI Journal*, v. 80, n. 7, p. 189-196, 1997.
- HERSCHMILLER, D. W. Kraft cooking with split sulfidity a way to break the yield barrier? In: Breaking the Pulp Yield Barrier Symposium. Atlanta: TAPPI, 1998.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual 2023. Brasília: IBÁ, 2023.
- JU, Y. COMPACT COOKING G2 Technology. *Japan TAPPI Journal*, v. 63, n. 8, p. 884-888, 2009. DOI: 10.2524/jtappij.63.884.
- JU, Y. Cooking technologies of digesters for producing kraft pulp. *Japan TAPPI Journal*, v. 66, n. 10, p. 1059-1063, 2012.
- KLEPPE, P. J. Kraft pulping. *TAPPI Journal*, v. 53, n. 1, p. 35-47, 1970.



- LARRAIN, S.; PRADENAS, L.; PULKKINEN, I.; SANTANDER, F. Multiobjective optimization of a continuous kraft pulp digester using SPEA2. *Computers and Chemical Engineering*, v. 143, p. 107086, 2020. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107086.
- MARCOCCIA, B. S.; LAAKSO, R.; MCCLAIN, G. Lo-Solids pulping: principles and applications. *TAPPI Journal*, v. 79, n. 6, p. 179-188, 1996a.
- MARCOCCIA, B. S.; PROUGH, J. R.; LAAKSO, R. O.; PHILLIPS, J. R.; RYHAM, R. C.; RICHARDSEN, J. T.; CHASSE, R. F. Pulping with low dissolved solids for improved pulp strength. US Patent US5489363A, 1996b.
- MARCOCCIA, B. S.; PROUGH, J. R.; LAAKSO, R. O.; PHILLIPS, J. R.; RYHAM, R. C.; RICHARDSEN, J. T.; CHASSE, R. F. Dissolved solids control in pulp production. US Patent US5547012A, 1996c.
- MIYANISHI, T. Modeling of continuous kraft digesters for conversion to optimum modified cooking. *Japan TAPPI Journal*, v. 54, n. 12, p. 1686-1698, 2000.
- OLM, L.; TORMUND, D.; JENSEN, A. Kraft pulping with sulfide pretreatment. Part 1. Delignification and carbohydrate degradation. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, v. 15, n. 1, p. 62-69, 2000.
- PIKKA, O.; DE ANDRADE, M. F. Compact Cooking G2: improved cooking technology for eucalyptus. *O Papel*, v. 76, n. 2, p. 57-63, 2015.
- RAHMAN, M.; AVELIN, A.; KYPRIANIDIS, K. G. A review on the modeling, control and diagnostics of continuous pulp digesters. *Processes*, v. 8, n. 10, p. 1231, 2020.
- SAAVEDRA, I. S. Model-based optimization of a Compact Cooking G2 digesting process stage. 2016. 157 f. Master's thesis - Aalto University, Espoo, 2016.
- SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; HART, P. W. Kraft pulping of reduced metal content eucalyptus wood: process impacts. *BioResources*, v. 10, n. 4, p. 6538-6547, 2015.
- SEINO, I. Sumitomo/Sunds SuperBatch cooking system. *Japan TAPPI Journal*, v. 47, n. 7, p. 862-870, 1993.
- SHARMA, N.; BASERA, P. Green chemistry strategies in pulping and biomass valorization: toward a circular bioeconomy. *Frontiers in Chemistry*, v. 13, p. 1724324, 2025. DOI: 10.3389/fchem.2025.1724324.
- SHIN, N. H.; STROMBERG, B. Impact of cooking conditions on pulp yield and other parameters. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON EUCALYPTUS KRAFT PULP, 2003, Viçosa. Proceedings [...]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- SILVA JÚNIOR, F. G.; MCDONOUGH, T. J. Polpação Lo-Solids de eucalipto: efeito do ritmo de produção. *O Papel*, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 69-81, 2002.
- SIXTA, H. (Ed.). *Handbook of pulp*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- UUSITALO, P.; SVEDMAN, M. Batch cooking applications. In: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. J. (Ed.). *Chemical pulping*. Jyväskylä: Gummerus Printing, chap. 5, p. A493-A511, 1999.
- VASCONCELOS, F. S. R.; SILVA JÚNIOR, F. G. Evaluation of the SuperBatch pulping process for Pinus taeda. In: TAPPI ENGINEERING, PULPING AND ENVIRONMENTAL CONFERENCE, 2008. Proceedings [...]. TAPPI Press, 2008.
- WECKROTH, R.; HILJANEN, S. SuperBatch™ cooking: from innovation to experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW AVAILABLE TECHNIQUES, 5. 1996, Stockholm. pt. 1, p. 449-474, 1996.
- WENAEL, D. P.; AZIZ, M. M.; MULYONO, P. Techno-economic analysis of Kraft pulp production through Compact Cooking and Lo-Solids technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, 10., 2024, Yogyakarta. *Advances in Engineering Research*. Atlantis Press, 2025. DOI: 10.2991/978-94-6463-772-4-6.