

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS DE COMPACTAÇÃO DE CAVACOS DE EUCALIPTO EM UM DIGESTOR CONTÍNUO COMPACT COOKING G2

Autores: Maria Emilia Drummond Blonski ¹, Glaucio Francisco de Moura ¹, Carolina Gabriela Lopes Araújo ¹, Carlos Verciano Costa Santos ¹
Suzano Papel e Celulose, Imperatriz, Brasil ¹.

RESUMO

Um dos principais problemas de operação do digestor contínuo é o desequilíbrio na movimentação da coluna. Distúrbios no grau de compactação e instabilidades no movimento hidráulico da coluna de cavacos no interior do digestor causam alterações no tempo de retenção, perdendo-se por completo o controle do tempo de reação. Como consequência afeta-se a produção, a qualidade e a uniformidade do produto. No campo da polpação química, poucos são os artigos relacionados ao diagnóstico de problemas industriais, com maior raridade ainda para diagnósticos em distúrbios de compactação de cavacos. Este trabalho teve como objetivos agrupar em uma variável, chamada Indicador de Prisão de Coluna, as principais informações de processo relacionadas à prisão de coluna de cavacos em um digestor contínuo Compact Cooking G2 e avaliar seu comportamento durante os distúrbios operacionais. O conhecimento da tendência deste índice de referência, a interação das variáveis de processo uma com as outras, bem como a ponderação de cada uma dessas variáveis, permitiu antecipar decisões visando minimizar os impactos das variações do tempo de retenção na qualidade da polpa produzida e no ritmo de produção. Os resultados obtidos permitiram um melhor entendimento das ocorrências de retenção da coluna de cavacos, facilitando o controle operacional do equipamento durante instabilidades, por meio da antecipação das ações nas variáveis manipuladas principais, minimizando as perdas de produção e de qualidade do produto.

Palavras-chave: Cozimento, Compact Cooking G2, Prisão de Coluna, Compactação

INTRODUÇÃO

A planta de cozimento da Suzano Papel e Celulose Unidade Imperatriz é composta por um vaso de impregnação atmosférico e um digestor Compact Cooking de segunda geração (G2), com 69 m de altura e 12,5 m de diâmetro, e utiliza o processo kraft modificado. Sua capacidade de produção é de 5550 tsa/d de polpa de eucalipto, sendo sua operação em fase vapor. A tecnologia caracteriza-se pelas altas taxas de relação licor/madeira durante as fases iniciais da etapa de cozimento, com um nível muito alto de licor negro presente no licor de cozimento. O processo opera com baixas temperaturas de impregnação e de cozimento, buscando maximizar o rendimento e propriedades da polpa.

A modelagem matemática tem sido largamente utilizada no processo Kraft, em diferentes níveis de complexidade, para avaliar a influência de diversas variáveis no processo de cozimento. Entretanto, o grau de compactação de cavacos é relativamente pouco explorado [1]. Os distúrbios de compactação de cavacos no digestor aumentaram com o incremento da altura da coluna de cavacos, decorrente da evolução das tecnologias com a introdução de zonas de lavagem no fundo do digestor. A utilização de um vaso de impregnação em separado para o cozimento contínuo, como observado no Compact Cooking G2, foi desenvolvida nos anos 1960, permitindo reduzir a altura do digestor e, em consequência, diminuir a compactação de cavacos e os distúrbios na movimentação hidráulica da coluna [2].

Outro ponto sobre os digestores contínuos é que, quando operam acima da capacidade de produção do projeto, necessitam de maior volume de reagentes químicos e de maior temperatura por área do equipamento, uma vez que há o aumento volumétrico de descarga da polpa e a redução do tempo de retenção. Como consequência, esses digestores apresentam excessiva compactação da coluna de cavacos nas regiões de extração, incrustações nas peneiras de extração (especialmente as inferiores), e maior movimento hidráulico da coluna no centro do digestor. Esses fenômenos geralmente ocorrem consecutivamente e causam o fenômeno conhecido como "prisão de coluna". Um grau de compactação uniforme é essencial para manter o movimento fluente da coluna de cavacos e, por conseguinte, manter o controle do tempo de residência, temperatura e distribuição da carga de álcali. O teor de fibras no filtrado em níveis elevados também pode contribuir para os distúrbios de prisão de coluna, por causar perda de capacidade de extração e elevação dos diferenciais das peneiras.

As principais características dos distúrbios de "prisão de coluna" são: variações bruscas nos níveis parcial e total de licor, elevação do nível de cavacos, elevação da pressão do topo do digestor, elevação do diferencial de pressão das peneiras de extração, redução da carga do raspador de fundo do digestor e elevação súbita da temperatura de descarga (resultante da formação de canal preferencial de licor). Tais ocorrências não necessariamente se apresentam de maneira simultânea, são referências para indicar que o digestor saiu do equilíbrio de entrada e saída do balanço de massa (licor, cavaco e polpa), e que está ocorrendo retenção da coluna de cavacos em algum ponto [2].

Se o grau da compactação da coluna de cavacos é conhecido no digestor, os distúrbios de processo são mais fáceis de identificar e corrigir, adequando o processo às condições padrão de operação. Esse é um problema de controle típico em digestores contínuos, com ênfase particular aos de processo fase vapor [2]. Os distúrbios relacionados à prisão de coluna são relativamente frequentes no digestor estudado neste trabalho.

O digestor Compact Cooking G2 possui um mecanismo auxiliar de lavagem chamado Radial Wash, que permite a adição de licor de lavagem no tubo central que se estende até a região das peneiras de extração inferior. Na Unidade Imperatriz, durante a utilização do Radial Wash, observou-se maior dificuldade operacional com relação aos distúrbios no grau de compactação e às instabilidades no movimento hidráulico da coluna de cavacos.

De forma geral, os operadores avaliam um amplo grupo de variáveis para diagnosticar a prisão de coluna. Após a caracterização dos distúrbios de compactação de cavacos, o operador começa a tomar ações corretivas, visando restabelecer o equilíbrio do digestor. Essa análise deve ser rápida, para que possam ser tomadas ações corretivas a fim de evitar maiores problemas para o processo, principalmente o aumento de rejeitos devido à canalização da coluna. Entre essas ações, as principais são a redução do fator de diluição no fundo do digestor e do fator de extração nas peneiras inferiores. Se as ações iniciais não surtirem efeito, é necessário reduzir a alimentação de cavacos e, ao mesmo tempo, aumentar a descarga da polpa, entre outras alterações. A associação sinérgica dessas atividades provoca um "espaço vazio" no interior do digestor, tendo um completo descontrole da principal variável de processo, que é o tempo de residência. Após o desprendimento da coluna, o nível de cavacos cai drasticamente, mesmo mantendo alimentação contínua do digestor com descargas reduzidas.

Os cozimentos em digestor contínuo são muito difíceis de modelar e controlar devido à natureza não linear do processo. O digestor contínuo é um sistema complexo, com tempo de residência longo, com poucos e difíceis pontos de medição, causados pelo sistema a alta pressão e temperatura [3]. Além disso, no digestor Compact Cooking

G2 analisado nesse estudo, os pontos de ajuste localizam-se apenas no topo, já que não há recirculações. O digestor representa um alto investimento de capital para as fábricas. Simulações do processo, incluindo a previsão do grau de designificação e da distribuição de fluxo de licor e cavaco, formação de canal preferencial, regiões de estagnação, temperatura e as concentrações químicas dentro do digestor, podem levar a melhorias significativas do desempenho operacional, e tem sido objetivo de diversos trabalhos.

Os fenômenos físicos e químicos que ocorrem dentro do digestor são uma mistura complexa de reações químicas e fenômenos de transporte. As variáveis de processo possuem forte relação umas com as outras, ocorrem nas três fases (sólido/líquido/gás), e são fortemente dinâmicas. A dificuldade de se obter dados por medição leva a um grande número de parâmetros incertos. Por esta razão, a modelagem e identificação das equações do processo de cozimento é um problema desafiador [2].

O objetivo deste trabalho é concentrar em agrupar em uma variável, chamada "Indicador de Prisão de Coluna", as principais informações de processo relacionadas à prisão de coluna de cavacos em um digestor contínuo Compact Cooking G2 e avaliar seu comportamento durante os distúrbios operacionais. As variáveis selecionadas foram: diferencial de pressão das quarta, quinta e sexta peneiras de extração inferior, carga no raspador de fundo do digestor e temperatura da descarga. Tais variáveis foram coletadas por meio do SDCD, submetidas a uma abordagem de raciocínio de lógica *fuzzy* e associadas a limites empíricos de variações, resultando em um índice de monitoramento dos distúrbios de prisão de coluna. O efeito da utilização do Radial Wash nas variáveis que compõem o "Indicador de Prisão de Coluna" também foi analisado.

MÉTODOS

A unidade industrial estudada utiliza cavacos de eucalipto de tamanho médio entre 23 e 25 mm e densidade básica média entre 490 e 510 kg/m³.

O digestor foi instalado em 2013 com tecnologia Compact Cooking G2 (Figura 1). Tem altura de 69 m e diâmetro de 12,5 m, com capaci-

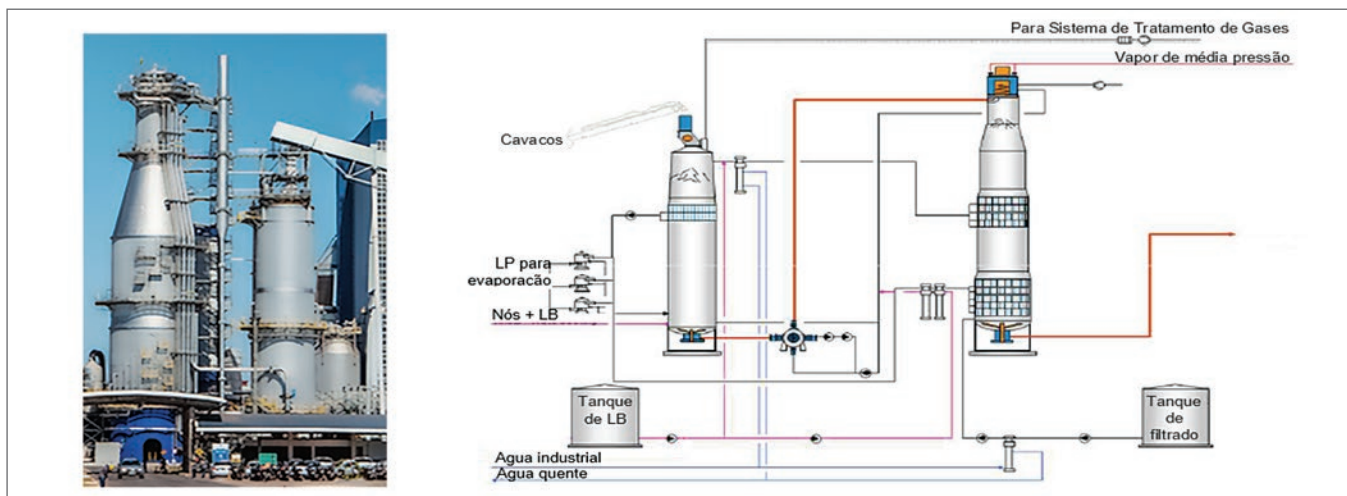


Figura 1. Digestor Compact Cooking G2

dade para produção de 5550 tsa/d de polpa de eucalipto de número kappa 14-16, sendo sua operação em fase vapor. Tem como referência de produção normal o medidor de cavacos operando em 12 RPM.

Os dados de processo foram coletados em um período de três meses, com frequência de cinco minutos por intermédio do software PI Process Book. Foram desconsiderados períodos com produção menor que 4000 tsa/d.

Foram aplicados testes de lógica *fuzzy* aos dados de processo coletados para geração de um "Indicador de Prisão de Coluna" capaz de prever o grau de compactação e a estabilidade operacional do digestor. O conceito do índice é que as diferentes condições operacionais do equipamento que têm relação com os distúrbios de compactação sejam representadas em uma única variável. O objetivo é sinalizar ao operador o desempenho operacional do digestor em um determinado momento, possibilitando que sejam antecipadas ações para minimizar problemas de compactação de cavacos. O "Indicador de Prisão de Coluna" gera uma estimativa on-line do desempenho operacional do digestor. Se estiver elevado, é um indicativo de que o digestor está com sintomas de prisão de coluna, sugerindo antecipar ações corretivas do operador para minimizar perdas de produção e qualidade. O índice, que é a somatória dos resultados do teste de lógica, atinge um valor de zero a nove, e serve como referência para que o operador tome ações corretivas visando minimizá-lo, por meio da redução das variáveis manipuladas ou através da redução da produção.

Foram selecionadas cinco variáveis de processo do cozimento para composição do "Indicador de Prisão de Coluna":

- Pressão diferencial das peneiras de extração inferior: Pode estar associado aos problemas de incrustações das peneiras, ou ainda de formação de canais preferenciais do licor. Alto diferencial de pressão é um indicativo de que a pressão interna do digestor está muito maior do que a parte externa, apresentando restrição ao fluxo de extração. Foram considerados os diferenciais da quarta, quinta e sexta peneiras da extração inferior (três variáveis distintas), que apresentam maior variação nos casos de distúrbio.
- Carga do raspador de fundo: É um indicativo do perfil de pressão do digestor e do grau de compactação da zona inferior do equipamento. A carga do raspador de fundo diminui nos distúrbios de prisão de coluna, aumentando rapidamente quando ela se desprende.

- Temperatura da descarga: Valores de temperatura elevados indicam que o licor não está processando adequadamente na zona de lavagem e resfriamento e, principalmente, que não está ocorrendo uma homogeneização da suspensão de fibras e licor. Quando há problemas de retenção da coluna, a temperatura de descarga atinge rapidamente valores acima de 100 °C. Foi verificado o valor instantâneo de cada uma dessas variáveis e aplicado um teste de lógica, tendo como resultado um valor numérico que depende da grandeza da variável e dos limites de referência estabelecidos, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Limites de Referência de Contribuição ao Indicador de Prisão de Coluna

Variáveis	Limites		
	1	2	3
Pontuação			
Soma do diferencial das três últimas peneiras Inferiores	$0,7 \leq x < 0,8$	$0,8 \leq x < 0,9$	$x \geq 0,9$
Carga do Raspador de Fundo	$95 < x < 120$	$85 < x \leq 95$	$x \leq 85$
Temperatura da Descarga	$95 \leq x < 98$	$98 \leq x < 100$	$x \geq 100$

O "Indicador de Prisão de Coluna" varia então de zero a nove, dependendo dos níveis de criticidade das variáveis que identificam os distúrbios de compactação da coluna de cavacos.

Os dados foram coletados durante três meses a cada cinco minutos e compilados ao "Indicador de Prisão de Coluna" conforme as cinco variáveis previamente descritas. O resultado do "Indicador de Prisão de Coluna" é a soma destes valores numéricos atribuídos.

Os resultados obtidos foram analisados de acordo com o histórico dos eventos de prisão de coluna previamente identificados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme indicado na Tabela 2, o "Indicador de Prisão de Coluna" (IPC) teve soma de 23648, e média amostral de 0,84. O intervalo de confiança obtido pela média populacional foi de $0,83 < \mu_{IPC} < 1,67$, com 95% de confiança.

Tabela 2. Estatísticas Descritivas das Variáveis do Indicador de Prisão de Coluna (IPC) e Intervalos de Confiança

Variáveis	N	Soma	Média	Limite Inferior	Limite Superior
Soma PDI	28174	14750,42	0,5235	0,5141	0,5326
Carga Raspador de Fundo	28174	3791574	134,58	134,44	134,72
Temperatura de Descarga	28174	2620159	93	92,89	93,11
IPC	28174	23648	0,84	0,83	0,85

Para verificação da relação entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, que é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior a correlação linear direta, e quanto mais próximo de -1 maior é a correlação linear inversa. As correlações das variáveis com o "Indicador de Prisão de Coluna" são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Correlação das variáveis com o Indicador de Prisão de Coluna (IPC)

	Soma dos PDI's	Carga Raspador de Fundo	Temperatura de Descarga
IPC	0,709	-0,247	0,369

O *p value* foi igual a zero para todas as variáveis, validando a significância estatística dos resultados.

Os eventos de prisão de coluna anteriores à criação do índice foram analisados, sendo estabelecidos os seguintes níveis de criticidade:

- Valores entre 0 e 3 = Condição normal de processo
- Valores entre 4 e 6 = Condição de alerta
- Valores entre 7 e 9 = Condição crítica de prisão de coluna

Os resultados do índice foram disponibilizados ao operador na forma on-line, para sua avaliação e tomada de decisão nas intervenções operacionais, buscando antecipar as correções e minimizar as perdas de produção. O índice foi disponibilizado em planilha Excel e também foi criado um alerta na tela de operação do painel do SDCD quando ele atinge valores críticos. Os gráficos de linhas abaixo indicam a curva do "Indicador de Prisão de Coluna" em situações de distúrbios de compactação (Figura 2). As linhas tracejadas representam o início e o fim de cada evento. O gráfico da Figura 3 mostra a contribuição de

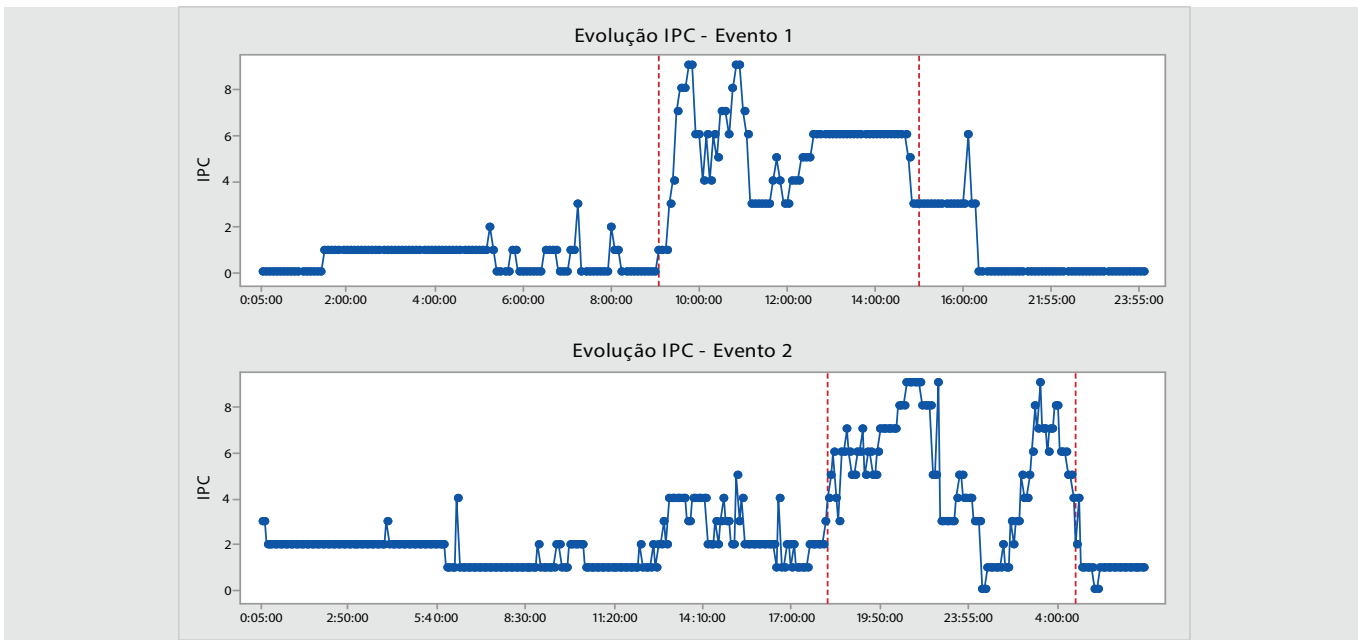


Figura 2. Comportamento do Indicador de Prisão de Coluna em Situações de Distúrbio

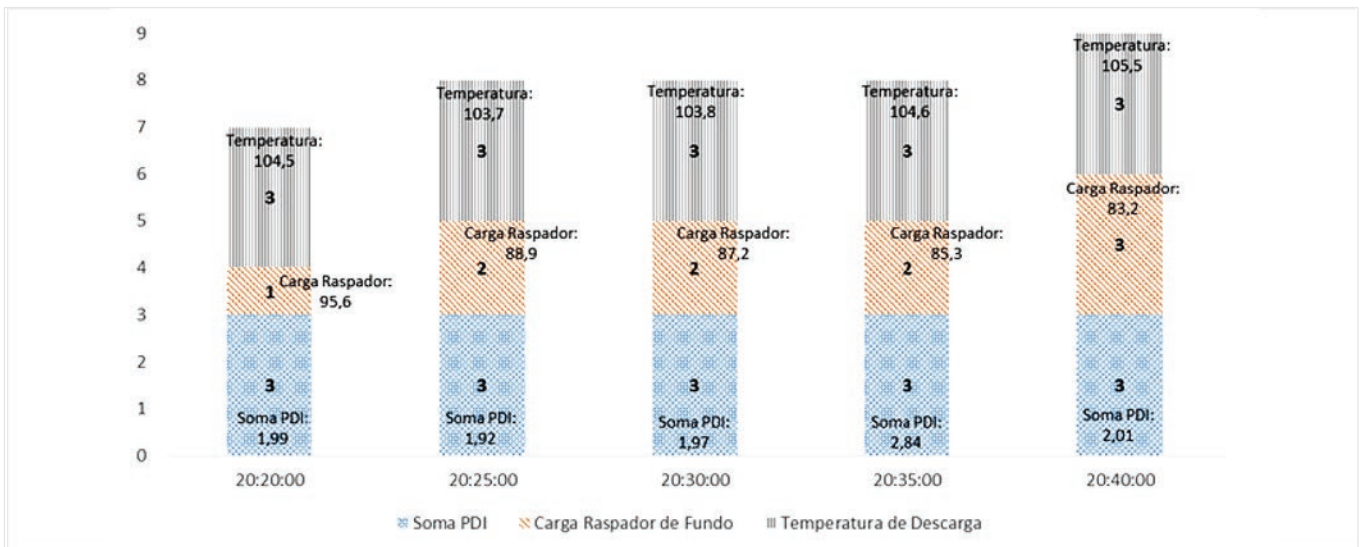


Figura 3. Contribuição de cada variável com o IPC entre 20:20 e 20:40h – Evento 2

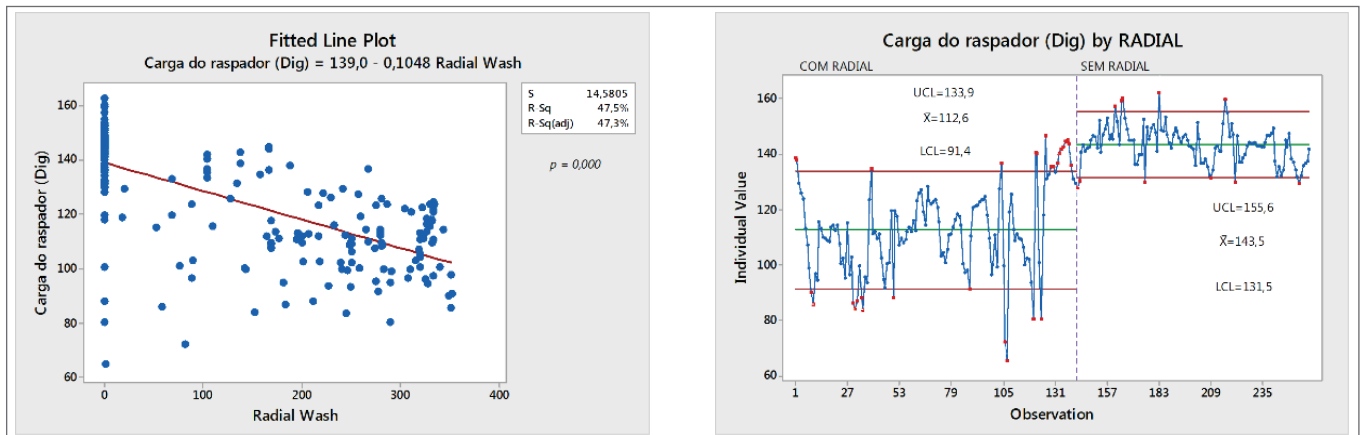


Figura 4. Efeito do Radial Wash na carga do raspador de fundo do digesto

cada variável com o “Indicador de Prisão de Coluna” entre 20:20 e 20:40h para o evento 2. Neste gráfico é possível perceber a oscilação de valor entre cada variável e como suas variações contribuem para o crescimento do índice.

Puranen [4], selecionou cinco variáveis para o seu modelo. Considerou como relevantes o número kappa, consistência de descarga, os níveis de licor e cavaco, e o diferencial de pressão das peneiras de extração. Ahvenlampi e Kortela [5], em suas investigações, agruparam sete variáveis em uma. Consideraram como relevante as temperaturas da zona de lavagem, os níveis de licor e cavaco, diferencial de pressão das peneiras, volume e temperatura de descarga da polpa e fluxos de extração. Já Puolakka [6], considerou três medidas de processo, que foram a diferença entre o nível de licor e cavaco, a temperatura de extração e o diferencial de pressão das peneiras de extração.

As análises dos efeitos do Radial Wash nas variáveis que compõe o “Indicador de Prisão de Coluna” indicaram que a adição de licor no tubo central contribuiu para a queda da carga no raspador de fundo do digestor. Por esse motivo, esse mecanismo de lavagem deixou de ser utilizado no digestor. A correlação foi de 47,3% e p value igual a 0, o que permite inferir que o resultado encontrado é estatisticamente significativo. Os gráficos podem ser vistos na Figura 4.

Para as variáveis de temperatura da descarga do digestor e para o diferencial das peneiras inferiores, não houve resultados estatisticamente diferentes com ou sem o Radial Wash.

Depois de caracterizado o fenômeno de distúrbios de compactação de cavacos, diversas ações podem ser tomadas para que o digestor volte a operar em condições estáveis, entre elas:

- Minimizar as variações na alimentação de cavacos, mantendo as características de espécie, densidade, umidade, granulometria o mais uniforme possível.
- Garantir temperatura e tempo de retenção adequados nos equipamentos de pré-impregnação [7].
- Reduzir ou eliminar o fluxo nas peneiras com alto diferencial de pressão, permitindo que o fluxo de cavacos faça uma “limpeza” nas paredes das peneiras [8].

- Reduzir ou eliminar o fluxo no Radial Wash, a fim de evitar a canalização no centro da coluna.
- Buscar cozimentos que resultem em um maior o número kappa, visando aumentar a porosidade e diminuir o grau de compactação na base do digestor [9,10]. Esse objetivo deve ser buscado com cautela, pois o número kappa elevado para polpa de eucaliptos apresenta excesso de rejeitos e, dependendo das instalações de depuração, pode comprometer significativamente sua operação, provocando entupimentos generalizados.
- Aumentar a diferença entre o nível de licor e de cavacos, sem perder a referência. O incremento desta diferença faz aumentar o grau de compactação na parte superior do digestor, acarretando maior uniformidade de cozimento e minimizando as chances de formação de canal preferencial de licor [11]. Observar a corrente do separador de topo, para que não ocorra intertravamento por corrente alta.
- Manter o fator de descarga nos níveis normais de operação. A ação de aumentar esse fator pode causar a formação de zonas descompactadas no digestor. Se necessário, reduzir a produção.
- Minimizar os fluxos de licor de lavagem na base do digestor, visando aumentar o deslocamento no fluxo vertical descendente [6]. Avaliar as restrições de limite de temperatura de descarga. Caso necessário, desviar os mecanismos de intertravamento, avaliando suas consequências. O prejuízo da lavagem momentânea pode ser menor do que os efeitos duradouros de distúrbios de compactação de cavacos.
- Utilizar dos recursos de purgas e contra lavagens das peneiras de extração, para baixar os diferenciais de pressão.
- Depois de reestabelecido o equilíbrio no digestor, avaliar a retomada de produção. É importante considerar o tempo de retenção completo do digestor, para permitir a substituição de todo o volume de cavacos com compactação anormal. Este é um tempo de referência para a normalização da operação, depois de normalizados os níveis de licor e cavaco, dentro das faixas de trabalho. É de extrema importância considerar as particularidades de cada processo na definição das variáveis que compõem o Indicador de Pri-

são de Coluna. O número kappa, apesar de sua extrema importância, é pouco recomendável para ser utilizado na definição do indicador, por ser uma variável discreta, de obtenção demorada pelas análises do laboratório, e de resposta longa mesmo por meio dos analisadores automáticos. Por outro lado, a facilidade de obtenção das demais variáveis na zona de descarga favorece sua utilização.

CONCLUSÕES

Os digestores apresentam um número vasto de informações ao operador, além de inúmeros recursos de alarmes e intertravamentos. Um melhor uso dessas ferramentas pode ser feito se as informações forem utilizadas para ações preventivas aos distúrbios, em vez de ações corretivas. A criação de variáveis únicas que agrupem outras variáveis de relevância para identificação de problemas é uma ótima alternativa para facilitar a análise das informações pelo operador, permitindo que os distúrbios possam ser identificados antecipadamente.

Um dos distúrbios mais comuns no processo de cozimento é a prisão de coluna, que pode afetar a qualidade e uniformidade da polpa de celulose, e até mesmo resultar em parada nas etapas subsequentes ao cozimento. Este trabalho identificou as variáveis mais relevantes para reconhecer o problema de prisão de coluna em um digestor Compact Cooking G2, sendo elas o diferencial das peneiras inferiores, a carga no raspador de fundo do digestor e a temperatura da descarga.

Com as variáveis identificadas, foi composto o Indicador de Prisão de Coluna, que permitiu identificar preventivamente os sintomas de prisão de coluna, possibilitando que o operador tomasse as ações corretivas e evitasse maiores problemas e perda de produção. Entre

as ações tomadas pelo operador, destacam-se a redução do fator de diluição no fundo do digestor e do fator de extração nas peneiras. Outras ações, como minimizar as variações no cavaco alimentado, nem sempre são possíveis devido à madeira disponível na fábrica. A ação de aumentar o fluxo de descarga do digestor deve ser evitada, já que pode gerar maior instabilidade. O uso do indicador por tempo prolongado permitirá a avaliação dos impactos nas perdas de produção por distúrbios de prisão de coluna no digestor.

O comportamento das variáveis do Indicador de Prisão de Coluna foi comparado nos períodos com e sem a utilização do Radial Wash. Os resultados mostraram que a adição de licor de lavagem no tubo central do digestor contribuiu para a diminuição da carga do raspador de fundo. Para as variáveis de temperatura da descarga do digestor e diferencial das peneiras inferiores, não houve resultados estatisticamente diferentes com ou sem o Radial Wash. A associação entre a utilização do Radial Wash e a potencialização dos distúrbios na movimentação hidráulica da coluna fez com que esse mecanismo adicional de lavagem deixasse de ser utilizado no digestor analisado nesse estudo.

É importante ressaltar que as particularidades de cada fábrica, os gargalos de processo e as práticas de operação são muito importantes na interpretação do índice criado. Por fim, o treinamento contínuo da equipe operacional, buscando aprimorar os conhecimentos técnicos, é fundamental para que as informações geradas sejam bem utilizadas.

AGRADECIMENTO

À Suzano Papel e Celulose pela oportunidade e disponibilização dos recursos necessários ao desenvolvimento do trabalho. ■

REFERÊNCIAS

- Ahvenlampi, T.; Kortela U. Clustering Algorithms in Process Monitoring and Control Application to Continuous Digesters. *Informática* 29 (1), 2005, p 99-107.
- Correia, Flávio Marcelo, M. Sc. *Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em digestores contínuos fase vapor*. Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2010.
- Bhartiya, S.; Dufour, P.; Doyle, F. J. III. Fundamental Thermal-hydraulic Pulp Digester Model with Grade Transition, *AIChE J.* 49 (2), p 411-425, 1996.
- Jansson, J.; Grobler, F.; Dahlquist, E. Model based control and optimization of continuous digester. *Tappsa Journal*, 2008.
- Lee, Q. F. *Fluid Flow through Packed Columns of Cooked Wood Chips*. M. Sc. Thesis, University of British Columbia, 2002.
- Malkov, S., Leavitt, A., Stromberg, B. *Improved Understanding of Chip Steaming and Impregnation*, *Engineering, Pulping, and PCE&I Conference*, 2004.
- Puolakka, H_M.; Tervaskanto, M.; Ahvenlampi, T. Observation and Visualization of the Chip Compaction Disturbances in Digester. In: *Tappi Engineering, Pulping, Environmental Conference, Proceedings*, 2005.
- Puranen, T. *Jatkovatoinmisen sellukeittimen häiriöntunnistus sumealla logiikalla*. Metso Automation Seminar. Helsinki, Finland. Proceedings, 1999, p 406-411.
- Laakso, S. *Modeling of Chip Bed Packing in a Continuous Kraft Cooking Digester*. Dr. Sc. Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2008
- Sidrak Y. Model based optimization of Kamyrdigester operation. *Tappi Journal*, 78 (3), 1995.
- Wisniewski, P.; Doyle, F.; Kayihan, F. Fundamental Continuous-pulp Digester Model for Simulation and Control. *AIChE Journal*, 43 (12), 1997, p. 3175-3192.