

# LÓGICAS AVANÇADAS PARA REDUÇÃO DO TEMPO DE PARTIDA E OTIMIZAÇÃO DA QUALIDADE EM MÁQUINA DE PAPEL – APLICAÇÕES EM MÁQUINA DE PAPEL CARTÃO

Lucas da Silveira Guadagnin<sup>1</sup>, João Henrique Godois Gurski<sup>1</sup>, Félix Rezende Santos<sup>1</sup>, Hilarion Bruxel Nunes<sup>1</sup>, João Guilherme Morais Santos<sup>1</sup>, Lucas Henrique da Silva<sup>2</sup>, Lucas de Oliveira Goes<sup>2</sup>, Andre Eduardo Batistel de S.<sup>2</sup>, Guilherme F. Mattos Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trisolutions Soluções em Engenharia LTDA. Brasil

<sup>2</sup> Klabin S.A. Brasil

## RESUMO

Máquinas de papel são sistemas complexos e dinâmicos onde cada uma das etapas possui impacto direto na seguinte. Os principais distúrbios e instabilidades ocorrem durante as transições de status de produção da máquina, como retorno de paradas e quebras ou trocas de produto (setups), em que não se produz papel com qualidade. Uma vez estáveis, a qualidade do papel produzido depende do desempenho de cada uma das etapas, que por si só depende do conjunto de estratégias de controle regulatório.

Estas estratégias são baseadas em lógicas simples ou controles do tipo PID operando somente por feedback, que por vezes não são capazes de lidar com a rejeição de distúrbios. Por geralmente estarem configuradas e sintonizadas para estados estacionários de produção, não são capazes de lidar de forma robusta e rápida com transições de status. Desta forma, controles sem correlações diretas entre si ou com setpoints sem atualização pela operação, podem levar a máquina a patamares estacionários distantes do ponto ótimo de operação desejado.

Este trabalho busca apresentar duas soluções baseadas em lógicas avançadas de controle que obtiveram êxito na redução do tempo de partida após parada de máquina em até 60% pela aceleração da estabilização do pH da caixa de entrada e na compensação de ineficiências causadas pela ausência de manipulação das pós-secarias, buscando estabilização da umidade relacionada à tinta aplicada ao papel e reduzindo em cerca de 50% o erro médio absoluto em relação ao objetivo de umidade pré-revestimento (máquina básica) para cada produto.

Projetos deste tipo baseiam-se em metodologias similares. A partir do mapeamento das oportunidades de remoção de gargalos, ineficiências ou ajustes de parâmetros de qualidade, desenvolvem-se lógicas do tipo sistema especialista, buscando reproduzir a estratégia que seria executada pelo dito “melhor operador”. Estas lógicas são desenvolvidas e executadas em servidor externo ao sistema digital de controle distribuído (SDCD), necessitando apenas da garantia de comunicação entre os sistemas desses dois níveis de controle, o que geralmente é feito por comunicação via padrão OPC. Dessa forma, o sistema especialista vai poder executar ações como chaveamento de modos, acionamentos e envio de setpoints calculados. Isto facilita a implementação, a manutenção da ferramenta e possíveis atualizações de sintonia ou valores de referência com mínima intervenção em SDCD.

**Palavras-chave:** máquina de papel cartão, lógicas avançadas, otimização de processo, sistema especialista.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de celulose e papel desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo um dos pilares da agroindústria e um dos principais motores de exportação do país. Com um crescimento constante, o setor alcançou números impressionantes em 2022, com uma receita bruta de R\$ 260 bilhões [9]. Além disso, a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) destaca que o setor é responsável por 128 mil empregos diretos e 640 mil empregos indiretos, reforçando ainda mais seu impacto social e econômico no país [15]. Estes resultados refletem a importância de melhorias contínuas nos processos e na tecnologia utilizada nas máquinas de papel.

As máquinas de papel evoluíram significativamente, incorporando avanços tecnológicos para aumentar a eficiência e a qualidade da produção. A otimização do processo, desde a preparação da polpa até a secagem do papel, é essencial para atender às demandas do mercado.

Tecnologias avançadas, como automação e controle em tempo real, acompanham este avanço e não só melhoram a produtividade, mas também garantem o atingimento das rigorosas normas ambientais e de qualidade exigidas.

A produção de papel em larga escala apresenta um caráter complexo, não-linear e multivariável [3]. Estes sistemas envolvem interações significativas entre múltiplos sensores e atuadores, que de forma intrínseca, influenciam as propriedades das folhas de papel produzidas [11]. Para que se alcance uma alta qualidade do produto, surge a necessidade de manter estes parâmetros dentro das especificações requeridas. Uma vez estabilizados, a qualidade do papel produzido dependerá do desempenho de cada etapa, influenciada pelas estratégias de controle adotadas.

Dentro dos controles aplicados neste processo, destaca-se neste documento a estabilização do pH na caixa de entrada como remoção do gargalo associado a esta etapa e o processo de secagem da umidade relacionada à aplicação de tinta como garantia de parâmetros de qualidade. Projetos de otimização destes processos foram desenvolvidos em conjunto com a operação e engenharia das máquinas de papel. Este documento visa apresentar a metodologia para implementação de estratégias de controle avançadas e os ganhos típicos obtidos com projetos deste tipo.

## **2. ASPECTOS TEÓRICOS**

### **2.1 pH**

O controle do pH é fundamental na produção de papel e celulose devido à sua influência direta na eficiência do processo e na qualidade do produto. Manter o pH em níveis aceitáveis garante a interação adequada dos produtos químicos com as fibras de celulose, evitando a saturação de produtos químicos que podem tornar o meio mais ácido e afetar excessivamente a retenção de carga e a estabilidade das máquinas [18]. A estabilidade das fibras de celulose, principal componente do papel, depende fortemente do pH. Um pH inadequado pode acelerar a degradação das fibras e reduzir a eficácia de aditivos que aumentam a resistência do papel. Além disso, o pH também afeta a carga superficial das fibras de celulose, influenciando a formação de ligações de hidrogênio e iônicas, cruciais para a resistência do papel [20].

O pH ácido pode ter vários efeitos adversos, como a degradação acelerada das fibras de celulose, diminuindo a integridade estrutural do papel. Isso pode resultar em absorção desigual da tinta e problemas de aderência, além de alterar a cor e consistência da tinta. Em contraste, um pH neutro a ligeiramente alcalino é benéfico tanto para a resistência do papel quanto para a aplicação de tinta, promovendo melhor formação de ligações intermoleculares e uma superfície mais estável e menos reativa [13].

A manutenção de um pH neutro ou alcalino é ideal para a eficácia de muitos aditivos de resistência, otimizando a formação de ligações intermoleculares entre a tinta e o papel. O controle adequado do pH pode prevenir problemas com a tinta e baixa resolução de imagem, além de evitar reações indesejadas entre a tinta e o papel, preservando a qualidade das cores e a nitidez da impressão [20].

Segundo Mendes (2011), a estabilidade do pH durante a fabricação do papel é essencial para garantir a formação adequada da folha e a remoção eficiente da água. A variação de pH pode causar a desestabilização de fibras e aditivos, levando a uma secagem inconsistente e, conseqüentemente, a problemas de qualidade no produto. Da mesma forma, Foelkel (2014) destaca que a estabilidade química na parte úmida do processo de fabricação, incluindo o controle do pH, é fundamental para a produção eficiente e de alta qualidade do papel.

### **2.2 Umidade do papel e sua influência na aplicação de revestimentos**

Uma secagem realizada de forma eficiente é necessária uma vez que se tenha como objetivo uma aplicação eficiente de revestimentos e tintas. Um produto que apresente um teor de umidade residual incorreto pode levar a uma diminuição da aderência de um determinado revestimento, resultando em defeitos estruturais e um produto menos uniforme.

Nas fibras da celulose podemos encontrar pontes de hidrogênio entre a água e as fibras celulósicas, que mantêm a água firmemente ligada ao papel, o que dificulta a evaporação

completa durante a secagem. Se o papel ainda contém umidade quando os revestimentos ou tintas são aplicados, a água residual pode migrar e evaporar posteriormente, causando bolhas e descolamento dos revestimentos.

Para realização do processo de secagem, costuma-se empregar cilindros aquecidos com vapor tendo em vista a redução da umidade do papel da forma mais uniforme, buscando minimizar os riscos de defeitos tanto estruturais quanto no aspecto do produto. Na indústria podemos encontrar também técnicas alternativas, como a secagem por infravermelho ou sistemas de circulação de ar aquecido, que também podem ser empregadas para garantir que a umidade seja removida de maneira eficiente, especialmente em áreas onde os cilindros secadores tradicionais podem não ser suficientes. Esse fenômeno é fundamental para o equilíbrio de umidade no papel, pois estas interações determinam a quantidade de água que o papel pode reter em condições ambientais específicas e garantem a estabilidade dimensional durante processos subsequentes, conforme Fernal (2023).

O controle rigoroso dos parâmetros de produção, incluindo temperatura e tempo de secagem, é essencial para assegurar que o papel atinja um nível de umidade dentro das especificações desejadas. Estrategicamente, o monitoramento contínuo e ajustes finos no processo de secagem ajudam a manter a qualidade do papel e a eficácia na aplicação de revestimentos e tintas. Nesses sistemas de produção de papel, se faz necessário buscar uma forma de controlar os parâmetros de produção. Para isso, podemos utilizar diferentes estratégias de controle.

### 2.3 Estratégias de controle de processos

Tendo como objetivo um controle estável em uma planta de produção, diferentes abordagens de controle poderão ser utilizadas. Na indústria, normalmente utiliza-se o controlador PID (proporcional, integral e derivativo), devido a sua confiabilidade e eficiência [1]. Porém, as estratégias que utilizam apenas o controlador PID operando por feedback apresentam limitações inerentes. Em primeiro lugar, como os ganhos de realimentação de um controlador PID clássico são configurados para valores constantes, o desempenho geral do sistema de malha fechada pode ser inferior ao requerido em situações de paradas na linha de produção ou atenuação de perturbações externas. Conseqüentemente, dinâmicas ou distúrbios não modelados são propensos a desestabilizar o sistema do regime de estabilidade projetado [14].

Na literatura é possível encontrar inúmeras formas de realizar um controle avançado, podendo citar por exemplo o controle em cascata, controle *feedforward*, controle MPC, controle especialista e a lógica *fuzzy*. Com esse grande leque de oportunidades, é necessário avaliar qual a ferramenta certa para resolver um determinado problema. A estratégia de controle cascata utiliza múltiplos loops de controle, proporcionando uma resposta mais precisa e robusta. Nesta configuração, emprega-se o uso de dois ou mais controladores, onde o controlador externo ajusta o setpoint do controlador interno [16]. Essa abordagem permite uma maior flexibilidade e precisão na regulação do sistema, sem envolver novas ferramentas de controle, utilizando apenas controladores PID, cujo conhecimento já está bem consolidado. Estes controladores PID atuam como bloco de construção para alcançar um controle satisfatório em sistemas multivariáveis mais avançados [8].

O controle *feedforward* prevê as mudanças no sistema e ajusta as entradas antecipadamente, melhorando a resposta a distúrbios previsíveis. Esta estratégia utiliza informações do próprio sistema, obtidas através de modelos matemáticos, simulações ou conhecimento do processo, para fazer ajustes na variável de controle e otimizar parâmetros de controle durante a produção [5].

Às vezes, sistemas dinâmicos multivariáveis que apresentam uma maior complexidade, não conseguem ser controlados por sistemas lineares. Neste caso, se faz necessário analisar a necessidade de utilizar estratégias mais complexas e robustas. Um método que pode ser utilizado para este tipo de situação é o controle MPC (*Model Predictive Control*), que visa otimizar o desempenho ao tentar prever o comportamento do sistema em um ponto futuro baseado em modelos. Para se obter esses modelos é necessário identificar padrões a partir dos dados de processo. Já o controle utilizando a lógica *fuzzy* emprega regras linguísticas para lidar com incertezas e imprecisões, oferecendo flexibilidade em sistemas complexos. Estas regras linguísticas compõem uma base de conhecimento formada pelo entendimento dos especialistas.

Utilizando também uma base de conhecimento criada pelo entendimento do processo, o controle especialista oferece uma abordagem eficiente para a regulação de sistemas complexos, permitindo ajustes adaptáveis às condições operacionais variáveis, visando emular a ação do especialista humano no sistema. [4]

As estratégias de controle básico baseadas em lógicas simples ou em controles do tipo PID, que operam apenas por feedback e que não estão diretamente correlacionados entre si, ou cujos *setpoints* não são atualizados durante a operação, podem levar a máquina a operar em patamares estacionários distantes do ponto ótimo desejado. Além disso, não oferecem uma resposta robusta e rápida às transições de produto, por exemplo. Para evitar esta situação, ao se observar o dia a dia na indústria, pode-se desenvolver um sistema que utiliza lógicas do tipo sistema especialista, buscando replicar a estratégia que seria executada pelo dito “melhor operador” naquela situação da planta, simulando a tomada de ação humana para resolver os problemas em um campo profissional [10].

### 3. ASPECTOS PRÁTICOS

#### 3.1 Metodologia para otimização de processos com projetos de controle avançado

Projetos de otimização por controle avançado de processo geralmente têm como ponto de partida a identificação de gargalos de processo, de especificações de qualidade que possuam margem para melhoria e de custos que possam ser reduzidos. A comparação com outras plantas industriais, ou o relato, vindo da operação, da ineficiência ou insuficiência dos controles básicos costuma direcionar as ações. A necessidade constante de manipulação pela operação costuma ser um ponto de alerta para estas ineficiências das estratégias de controle. A própria ausência de padronização da ação da operação compromete o desempenho do controle destas variáveis e aumenta a variabilidade do processo.

Estas ineficiências podem estar atreladas à presença de uma condição diferente da de projeto, à ausência de atualização das estratégias de controle para se adequar à nova realidade do processo e, principalmente, à constante busca por um melhor desempenho, visando o aumento da disponibilidade da máquina para produzir um papel seguindo seus requisitos de especificação de qualidade.

Para a proposição de uma solução eficaz para estes problemas, o correto entendimento do processo de fabricação de papel e das etapas envolvidas é crucial. Conceitos e etapas podem até ser similares de uma máquina de papel para outra, mas é necessário levar em consideração todas as particularidades do processo em questão. Neste ponto, o apoio da operação é essencial para que o entendimento seja correto e para que a solução a ser desenvolvida atenda às necessidades desta mesma operação, que se servirá da ferramenta uma vez implementada. Na automatização de ações que antes eram feitas manualmente, a melhor estratégia de controle será aquela que terá como ponto de partida a melhor ação manual da operação.

As operações unitárias, fluxos e equipamentos envolvidos, as estratégias de controle já existentes precisam ser mapeadas, bem como automatismos, cálculos e outras lógicas. Se existem malhas PID, é preciso verificar se são utilizadas pela operação, se é possível melhorar sua sintonia para que os *setpoints* sejam seguidos, se os instrumentos de medição e atuação envolvidos possuem problemas (falhas de medição e agarramento em válvulas são exemplos). A partir do entendimento do processo e suas estratégias de controle existentes, o conceito da estratégia a ser desenvolvida é discutido com engenheiros e consultores da máquina de papel e validado com os operadores.

A implementação dependerá das ferramentas disponíveis e da necessidade de utilização de cada uma delas. Por vezes é possível resolver o problema com implementações mais simples e robustas em SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). Dada a dificuldade de implementação e de manutenção de lógicas implementadas diretamente em SDCD, pela necessidade de atualização (*download*) e o risco atrelado a este movimento, opta-se geralmente pela utilização de um sistema externo para execução de lógicas. Conforme a necessidade e a complexidade do sistema, pode-se ou não utilizar algoritmos do tipo MPC, patenteados por fornecedores de tecnologia, ou desenvolvê-los usando diferentes linguagens de programação.

As duas soluções apresentadas neste documento baseiam-se no desenvolvimento de lógicas do tipo sistema especialista, buscando reproduzir a estratégia que seria executada pelo dito “melhor operador”. Estas lógicas são desenvolvidas e executadas em servidor externo ao sistema digital de controle distribuído (SDCD), necessitando apenas da garantia de comunicação entre os sistemas desses dois níveis de controle, o que geralmente é feito por comunicação via OPC (OLE for Process Control), baseado nas tecnologias OLE e DCOM. Dessa forma, o sistema especialista vai poder executar ações como chaveamento de modos, acionamentos e envio de *setpoints* calculados. Isto facilita a implementação, a manutenção da ferramenta e possíveis atualizações de sintonia ou valores de referência com mínima intervenção em SDCD, que deve ser preparado somente para receber estes sinais calculados pela lógica externa e repassá-los para o processo com segurança, dando a correta proteção para chaveamentos de modo e falhas de execução e comunicação.

O algoritmo deve incluir em sua estrutura proteções e automatismos que considerem situações importantes de processo, como as possíveis falhas de comunicação entre os servidores e a saturação das malhas de controle regulatório. As movimentações dos *setpoints* calculados só devem ocorrer naquelas malhas que tiverem o acionamento pela operação e sempre respeitando os limites mínimos e máximos estabelecidos pela equipe de operação ou engenharia.

Uma vez implementadas as lógicas de ambos os lados (SDCD e máquina externa), testes de comunicação e execução da lógica devem ser realizados “a frio”, sem conexão ao processo, para garantir a robustez do sistema implementado sem que haja risco de repassar movimentações incorretas que prejudiquem a produção. Ajustes de parâmetros de sintonia devem estar disponíveis para alteração *online*, sem necessidade de desligamento da aplicação para atualização, permitindo que os devidos ajustes sejam realizados durante a fase de comissionamento.

Comissionados e testados, os sistemas estarão prontos para serem disponibilizados à operação. Todos os operadores que terão envolvimento com a ferramenta precisam ser treinados quanto ao seu funcionamento e as possibilidades de acionamento e alterações via tela de operação. Ganha-se, portanto, uma nova ferramenta de controle e operação do processo, que precisa ser acompanhada para manutenção de seu desempenho.

### 3.2 Automatização do controle de pH para partidas da máquina de papel

A motivação central deste projeto foi a substituição de todo o sistema de fornecimento de ácido sulfúrico para a máquina de papel. Esta modernização encurtou linhas já existentes, incluiu novos trechos e substituiu tanques, válvulas e bombas. Estas modificações inviabilizaram a reutilização de estratégias de controle já implementadas anteriormente.

A estratégia de controle de projeto consistia em uma malha PID para controle de pH, vinculada ao ponto de medição na recirculação da caixa de entrada, para cada uma das camadas do papel envolvida neste projeto. Esta malha tem como atuação principal o fornecimento de *setpoints* para duas malhas internas de vazão de ácido sulfúrico, dividindo sua atuação conforme a proporção definida pela operação em tela. A Figura 1 representa de forma simplificada este sistema.

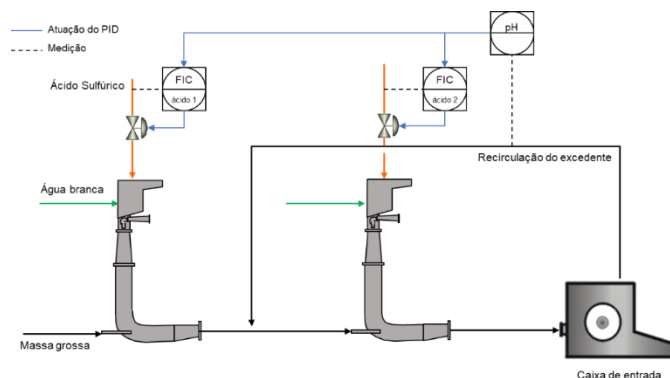


Figura 1: Diagrama simplificado do processo e malhas de controle de pH

A sintonia destas malhas PID precisou ser revisada para garantir estabilidade para o pH em condições de máquina estável, ou seja, quando já havia circulação de massa e água branca pela caixa de entrada. Esta estratégia se mostrou eficiente para controle do pH nestas condições. Porém, em condições de retomada de vazão após uma parada da máquina de papel, o pH do meio geralmente se encontra ligeiramente básico ou neutro, longe da faixa em que opera normalmente. A medição de pH é intrinsecamente não linear e a utilização da malha PID para controle desta variável desde a partida se mostrou inadequada, levando a oscilações frequentes causadas pela própria ação de controle, o que levava a operação a retomar a dosagem de ácido em modo manual.

A alternativa escolhida foi a reprodução da atuação do dito “melhor operador” em lógica desenvolvida em um sistema externo. A análise estatística dos melhores retornos realizados manualmente estabeleceu a sequência padronizada de acionamentos automáticos de válvulas de bloqueio para liberação da dosagem de ácido sulfúrico e as vazões típicas para cada faixa de pH medido.

A execução inicial da lógica acontece através da identificação do acionamento, pela operação, da bomba de vazão de massa de cada linha, sempre de forma individual e somente pelos equipamentos selecionados pela operação. A partir disto, o controlador envia o sinal via OPC para o SDCD realizar a abertura das válvulas de bloqueio de ácido sulfúrico de forma automática, desde que o controle da linha em questão esteja liberado pela operação e nenhum outro intertravamento o impeça.

Três valores de referência de vazão de ácido foram definidos conforme os diferentes de valores medidos do pH nas linhas. Buscou-se padronizar as vazões de ácido para se estabilizar o pH da forma mais eficaz e rápida possível, sem que houvesse uma dosagem excessiva de ácido sulfúrico, o que poderia ocasionar distúrbios prejudiciais ao processo. Caso o pH medido esteja abaixo do limite mínimo de especificação, não há dosagem de ácido. Se o pH estiver muito acima do limite superior de especificação, uma vazão maior é repassada para as malhas de controle. Conforme o pH alcança a faixa de estabilização, a vazão de ácido é reduzida para uma dosagem próxima dos valores médios de operação, com o intuito de manter o pH dentro da faixa de especificação e suavizar o retorno para o controle cascata convencional no SDCD. Ao identificar a estabilização do pH dentro ou abaixo da faixa de especificação, a própria lógica aciona o modo de operação padrão para as malhas de controle de vazão, que passam a ser manipuladas pela malha de controle regulatório de pH no SDCD. O algoritmo é reiterado a cada ciclo de execução, levando em consideração a medição de pH a cada iteração.

Parâmetros de sintonia, definição das faixas de estabilização, patamares de vazão de ácido, e intervalo entre execuções da lógica podem ser definidos no sistema especialista sem a necessidade de desligamento do controlador ou intervenção em SDCD. Estes ajustes costumam ser feitos pela equipe de engenharia e desenvolvimento de processos.

### **3.3 Automatização do controle de cilindros e capotas da pós-secaria**

O sistema de revestimento da máquina de papel cartão trabalhada apresenta três aplicadores de tinta em série. Cada um deles dispõe do seu conjunto de mecanismos de secagem da tinta aplicada: secadores por infravermelho, alimentados a gás; cilindros de secagem, alimentados com vapor de baixa pressão; capotas de circulação de ar quente, aquecido com troca de calor indireto com vapor de média pressão como fluido quente. Os secadores infravermelhos não possuem controle automático via SDCD, necessitando de intervenção manual em painéis dedicados para ligar ou desligar as fileiras de secagem individualmente. As capotas de circulação de ar e os cilindros a vapor possuem malhas de controle automático. O conjunto de mecanismos de secagem de todos os três aplicadores é chamado de pós-secaria neste documento.

Em alterações de produto que necessitam de alterações de velocidade da máquina, a capacidade de secagem da pós-secaria se altera. Isto se dá pela alteração do tempo de residência do papel em cada um dos mecanismos de secagem da pós-secaria. Nestas situações, malhas de controle PID que controlam a pressão de vapor nos cilindros e a temperatura do ar de secagem das capotas permanecem sem alterações de *setpoint* pela operação. Além disso, não havia previsão de manipulação automática por *feedback* a partir das medições dos scanners

óticos posicionados ao final da máquina base, após calandragem, e no produto, anterior à enroladeira.

O objetivo da ferramenta implementada é manipular os *setpoints* destes grupos de secagem da pós-secaria, responsáveis pela secagem da tinta, para dar controlabilidade para a umidade na saída da máquina base. À primeira vista, isto parece contraintuitivo, uma vez que a atuação se dá após a medição. Pela observação e análise de dados históricos do processo, chegou-se à conclusão de que os sistemas de secagem da pós-secaria não seriam capazes de garantir controlabilidade para a umidade do papel final, especialmente se comparados à capacidade de secagem de todos os cilindros disponíveis na secaria da máquina base. O controle de umidade do papel é garantido pela manipulação da pressão de vapor dos grupos da secaria por uma estratégia de controle desenvolvida pela Trisolutions anteriormente, baseada na soma de ações antecipativas (*feedforward*) das alterações da máquina base e de ações corretivas (*feedback*) a partir das medições da varredura ótica no produto acabado, pré-enroladeira.

A estratégia descrita neste documento busca, portanto, estabilizar a diferença entre a umidade medida em cada um dos pontos de varredura ótica, pré e pós revestimento. O valor de objetivo para esta diferença é ajustado conforme cada tipo de produto. Com manipulações suaves destes grupos da pós-secaria, busca-se evitar distúrbios e permitir a resposta pelo controle de umidade da máquina básica na secaria para não comprometer os parâmetros de qualidade do papel final. Indiretamente, controla-se a umidade na saída da máquina base e, com isto, permite-se que parâmetros de qualidade relacionados à aplicação de tinta sejam melhor controlados.

Os grupos de secagem disponíveis para controle automático tiveram suas malhas de controle PID sintonizadas para que atingissem o *setpoint* no menor tempo possível. Testes de processo foram realizados para identificar as respostas na umidade do papel a cada manipulação em degrau dos grupos de secagem da pós-secaria. Não foi possível identificar com precisão a dinâmica da resposta, dada a complexidade do processo e suas variações, especialmente de velocidade. Ainda assim, foi possível definir o ganho estacionário de umidade para cada um dos grupos disponíveis, a máxima variação possível dos *setpoints*, o tempo de intervalo entre cada uma das manipulações para garantir a estabilização do processo na nova condição e evitar manipulações excessivas que causem distúrbios ao processo. Estes e outros parâmetros foram definidos de forma que possam ser alterados pela equipe de engenharia sem necessidade de desligamento da aplicação.

A operação pode optar pelo uso de cada um dos grupos individualmente, sendo que pelo menos um grupo de secagem precisa estar disponível, alterar limites mínimos e máximos de cada um dos grupos (não são violados em nenhum momento pelo controlador) e definir um objetivo para a diferença de umidade entre as medições pré e pós revestimento. Estas ferramentas permitem que a operação adapte o uso do controlador a diferentes situações e produtos, sendo mais uma importante ferramenta para controle de propriedades vinculadas à aplicação de tinta e à umidade, como aspereza, rigidez, encanoamento, entre outros.

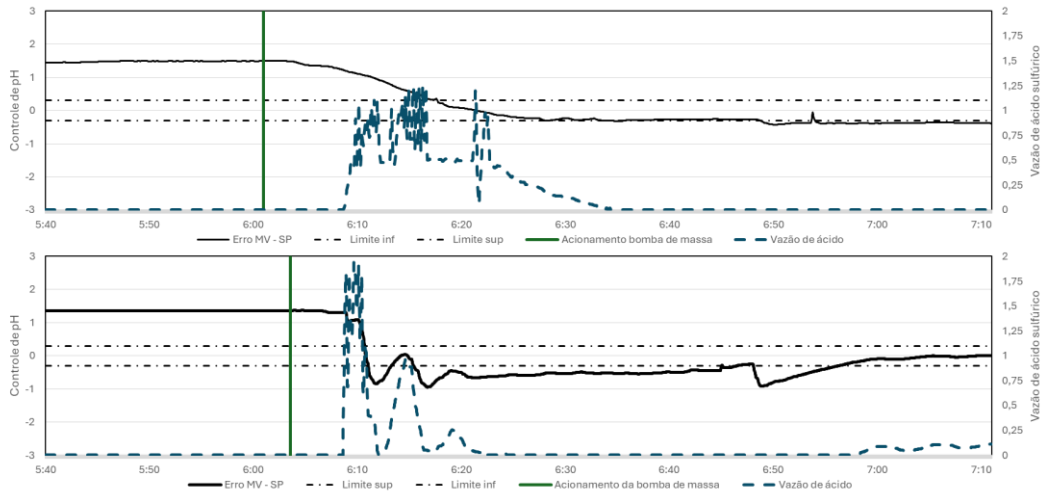
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Automatização do controle de pH para partidas da máquina de papel

O trabalho de análise dinâmica do processo de controle de pH e posteriores adequações no controle regulatório, junto ao desenvolvimento de algoritmos, foram decisivos para redução em mais de 60% do tempo médio necessário para estabilização do pH dentro da faixa de especificação ao redor do set-point definido para cada produto. Desta forma, foi possível reduzir o tempo médio de retomada a produção com papel especificado.

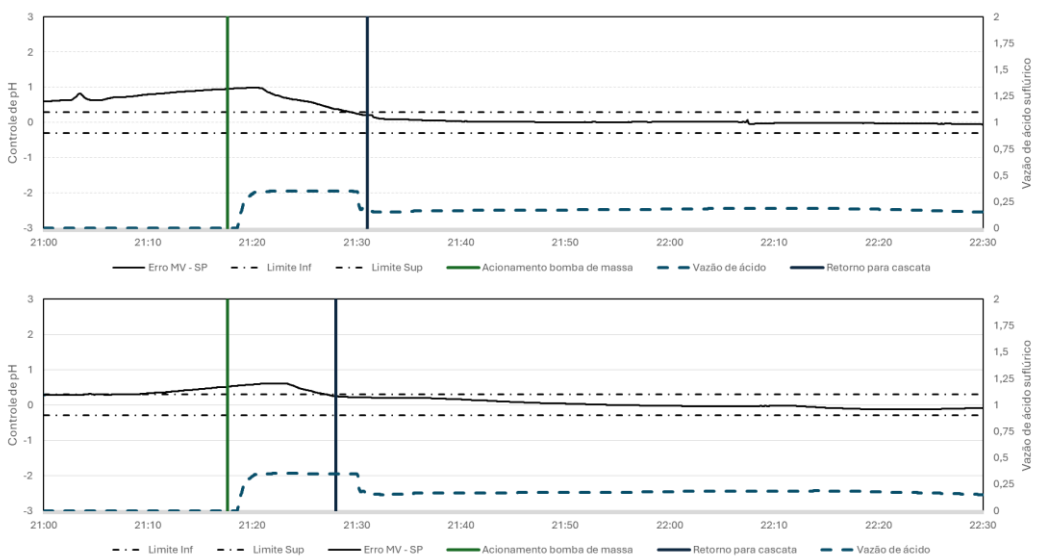
A Figura 2 exemplifica o comportamento do processo antes da implementação da lógica para as linhas meio (Fig. 2a, acima) e base (Fig. 2b, abaixo) da máquina de papel cartão em que o projeto de implementação de controle avançado foi implementado. Percebe-se uma demora no acionamento manual, pela operação, das dosagens de ácido em relação à partida da bomba de massa. O excesso do uso de ácido sem padronização da atuação gera a saturação da malha de controle em ambas as linhas, impedindo que as malhas de controle rejeitem possíveis distúrbios. Além disso, o chaveamento precoce do controle básico regulatório (controle cascata descrito na

Figura 1) para linha base (Fig. 2b) gera oscilações à medição causadas pela própria malha de controle, o que prejudica a estabilização.



**Figura 2: Comportamento do pH da caixa de entrada com atuação manual da operação, anterior ao controlador avançado.**

A Figura 3 exemplifica o comportamento do processo com o uso do controlador avançado e a sua estabilização após as ações executadas nas linhas meio e base de uma máquina de papel cartão. Observa-se o aumento da velocidade na estabilização do pH de acordo com suas faixas pré-definidas para especificação, o que permite a retomada da produção da máquina de papel de forma mais rápida. Isto se dá pela adequação da correta dosagem de ácido sulfúrico logo após a retomada da vazão de massa celulósica através do acionamento da bomba de massa de cada linha e o correto acionamento do controle via cascata (regulatório) de forma padronizada e individual, para cada linha.



**Figura 3: Comportamento do pH da caixa de entrada com atuação do controlador avançado**

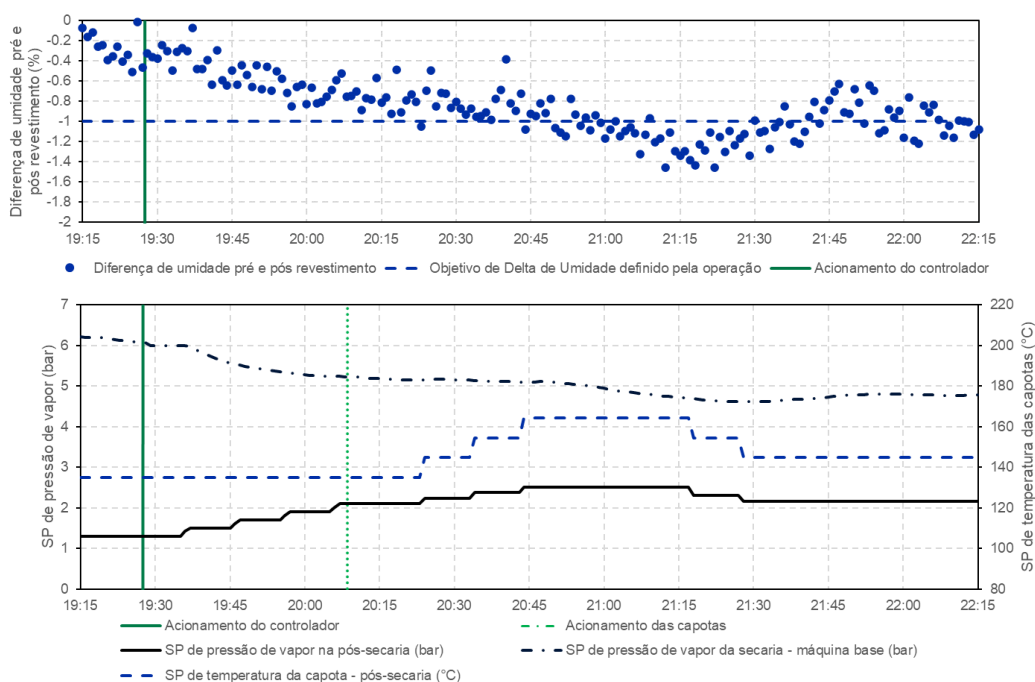
Em contraste à ausência de padronização de controle nas retomadas manuais pela operação, ao se analisar o tempo médio de estabilização da variável considerando-se diversas repartidas, a estratégia de controle avançado foi capaz de reduzir em até 60% o tempo necessário para estabilização do pH dentro da faixa de especificação de produto, o que remove este gargalo para retomada da máquina de papel, libera operadores para atuações em outras áreas e permite a mesma ordem de redução do tempo para reinício da produção.

## 4.2 Automatização do controle de cilindros e capotas da pós-secaria

A estratégia de controle avançado para otimização do balanço de umidade medida nas secarias (máquina básica) e pós-secarias (seção de secagem de tinta a partir do revestimento do papel) foi implementada e apresentou ótimos resultados na busca de novos patamares de operação. De acordo com os alvos de diferenciais de umidade entre a medição final e a intermediária, antes do revestimento e após a máquina básica, definidas para cada produto produzido na máquina de papel, a estratégia possibilita a padronização de valores ótimos de umidade medidos no frame intermediário. Sendo assim, foi possível produzir papel com características físicas superiores em relação à operação sem o controlador avançado.

Com a utilização da estratégia avançada, foi possível reduzir em 47,0 % o erro médio absoluto em relação ao alvo para a diferença entre as medições ao final da máquina e intermediária, anterior ao revestimento. A variabilidade da umidade medida no produto final não se alterou.

A Figura 4 representa um exemplo de atuação do controlador e seu efeito na diferença entre as umidades medidas nos dois pontos controlados. Na parte inferior da figura é possível perceber que a manipulação dos *setpoints* só se dá naqueles grupos disponíveis para controle e traz a umidade para o objetivo definido pela operação gradualmente, como observado na parte superior da figura. É possível perceber também a redução gradual do consumo de vapor pela secaria da máquina base, efeito indireto das manipulações da pós-secaria. Destaca-se, na segunda metade do gráfico, a redução dos *setpoints* para trazer novamente a umidade para a faixa objetivada ao corrigir, por feedback, distúrbios provavelmente gerados por outras etapas do processo ou por alterações nos próprios aplicadores de tinta.



**Figura 4: Exemplo de atuação do controlador avançado para controle da umidade na pós-secaria da máquina de papel**

## 5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou como soluções conjuntas de controle regulatório e avançado são importantes para otimização de processos distintos. Quando estas soluções são combinadas de forma efetiva, elas contribuem para que os sistemas apresentem maior disponibilidade de produção de papel e estabilidade no processo, melhorando a qualidade do produto. A atuação abrangente com a utilização de ferramentas diversas e o envolvimento das equipes foram fundamentais para o diagnóstico do sistema e o desenvolvimento de lógicas personalizadas, que contribuíram para que um novo patamar da operação no viés de qualidade e velocidade de estabilização de processo fosse alcançado pela unidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio de todas as equipes que participaram da execução do projeto. Equipes de Operação e Gestão Operacional, Processo, Automação, Manutenção da Klabin e Equipe Técnica e Comercial da Trisolutions.

## REFERÊNCIAS

- ALQAHTANI, Saeed; GANESAN, Subramaniam; ZOHDY, Mohamed A. The comparison between PI and PID controllers in engine speed control model. In: 2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). IEEE, 2020. p. 629-634.
- BOGAARD, J., & Whitmore, P. M. (2002). Explorations of the role of humidity fluctuations in the deterioration of paper. *Studies in Conservation*, 47(sup3), 11-15.
- ÇIÇEKLER, Mustafa; TUTUŞ, Ahmet. Overview of Quality Control in the Paper Industry. 2023.
- DE MELO, José Damião et al. Sistema especialista para o domínio do Licenciamento Ambiental: estudo de caso com Shell Expert Sinta. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 4297-4313, 2021.
- DRUZGALSKI, C. L., Ashby, A., Guss, G., King, W. E., Roehling, T. T., & Matthews, M. J. (2020). Process optimization of complex geometries using feed forward control for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 101169. doi:10.1016/j.addma.2020.101169
- FERNAL, Modesto Filho. Influência da higroscopia na estabilidade dimensional do papel cartão. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. 2023. Acesso em: 10 jul 2024
- FOELKEL, C. O Papel e a Qualidade da Produção. Artigo técnico, 2014. Disponível em: [https://www.celsofoelkel.com.br/artigos/2014\\_Tissue\\_Fabricacao.pdf](https://www.celsofoelkel.com.br/artigos/2014_Tissue_Fabricacao.pdf). Acesso em: 10 jul. 2024
- HÄGGLUND, Tore; GUZMÁN, José Luis. Give us PID controllers and 4we can control the world.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Relatório anual 2023. 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- LANZETTI, N., Lian, Y. Z., Cortinovis, A., Dominguez, L., Mercangoz, M., & Jones, C. (2019). Recurrent Neural Network based MPC for Process Industries. 2019 18th European Control Conference (ECC). doi:10.23919/ecc.2019.8795809
- L-Q. Hu, C-F. He, Z-Q. Cai, L. Wen, T. Ren, Track Circuit Fault Prediction Method based on Grey Theory and Expert System, *J. Vis. Commun. Image R.* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2018.10.024>
- MENDES, A.H.T. Diagnóstico de estabilidade dimensional de papel reprográfico por análise de imagem. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-11082011-120017/publico/Tese\\_Afonso\\_H\\_T\\_Mendes.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-11082011-120017/publico/Tese_Afonso_H_T_Mendes.pdf). Acesso em: 10 jul. 2024.
- MOSTAFA, R. et al. Influence of pulp suspension pH on: The performance of chitosan as a strength agent for hardwood CMP paper. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2016. Acesso em: 10 jul. 2024.
- NOHOOJI, Hamed Rahimi. Constrained neural adaptive PID control for robot manipulators. *Journal of the Franklin Institute*, v. 357, n. 7, p. 3907-3923, 2020.
- OLIVEIRA, Dennis Patrick de. O impacto do setor de celulose e papel na economia nacional. 2023. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Universidade de Taubaté, Departamento de Gestão e Negócios, Taubaté, 2023. Acesso em: 10 jul. 2024.
- PASHAEI, Shabnam; BAGHERI, Peyman. Parallel cascade control of dead time processes via fractional order controllers based on Smith predictor. *ISA transactions*, v. 98, p. 186-197, 2020.
- RIBEIRO, Guilherme Fernando. Cadeia produtiva de celulose: caracterização, produção e comercialização. 2022. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/220308310.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- SANTOS, J. S.; SANTOS, L.; SIQUEIRA, R. V.; AMARANTE, M. dos S. Melhoria do processo de fabricação de papel através da alteração da dosagem dos insumos químicos. *Revista Pesquisa e Ação*, v. 7, n. 1, p. 129-137, 2021. Acesso em: 10 jul. 2024.
- STENSTRÖM, S. (2019). Drying of paper: A review 2000–2018. *Drying Technology*, 1–21. doi:10.1080/07373937.2019.1596949
- STRAND, A. et al. The effect of chemical additives on the strength, stiffness and elongation potential of paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2017. Acesso em: 10 jul. 2024.
- WILLIS, Mark J.; THAM, Ming T. Advanced process control. Department of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, UK, 1994.