

# AUMENTO DE EFICIÊNCIA NA MATRIZ ENERGÉTICA DE UMA PLANTA DE PAPEL E CELULOSE USANDO CONTROLE BASEADO EM LÓGICA FUZZY: UM ESTUDO DE CASO

Haroldo Marinho dos Reis<sup>1</sup>, Danilo Lavigne Halla<sup>2</sup>, Sayonara Soares de Freitas Carneiro<sup>2</sup>, Heverton Fábio de Faria Dias<sup>1</sup>, Augusto Fernandes Milanez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Suzano Papel e Celulose. Suzano-SP, Brasil.

<sup>2</sup> I.Systems. Campinas-SP, Brasil

## RESUMO

*Este artigo apresenta uma aplicação de Controle Avançado de Processos para otimizar o consumo de combustível no parque de caldeiras da Suzano Papel e Celulose, unidade Suzano/SP, Brasil. Esta unidade utiliza três tipos de caldeiras (caldeira de recuperação, caldeira a gás natural e de biomassa) com diferentes eficiências, velocidades de combustão e entrega de vapor. Quando as oscilações de consumo de vapor da produção de celulose alcançam o coletor principal, as caldeiras devem atender a essa demanda de forma rápida e eficiente, caso contrário variações na pressão de vapor ocorrem, afetando a eficiência dos equipamentos.*

*Um software baseado em lógica Fuzzy foi implantado para controlar a carga e relação ar/combustível das caldeiras, com o objetivo de reduzir a variação de pressão e manter a demanda de vapor necessária para a produção. As caldeiras a gás passaram a responder antecipadamente aos picos de demanda para diminuir a variabilidade da pressão do vapor produzido, além de reduzir a geração com gás em momentos de estabilidade operacional. Dessa forma, a caldeira de biomassa pode produzir mais vapor nos cenários em que uma resposta mais lenta é suficiente, já que a biomassa possui menor custo de operação.*

*Através do gerenciamento automático de vapor, a plataforma de controle avançado da I.Systems reduziu a variação da pressão de vapor no coletor em 31%, resultando em um fornecimento energético de melhor qualidade. Ao trazer mais estabilidade operacional, o controle avançado aumentou a eficiência de cada caldeira e reduziu os custos envolvidos na geração de vapor, ao consumir 6% a menos de gás natural na matriz energética. Essa é uma tecnologia de controle desenvolvida recentemente no Brasil e que pode ser aplicada em diferentes operações unitárias, pois não depende de modelos fenomenológicos para o cálculo da resposta de controle.*

**Palavras-chave:** Recuperação e energia, Eficiência energética, Geração de vapor, Caldeiras, Lógica Fuzzy, Controle Avançado de Processos.

## 1. INTRODUÇÃO

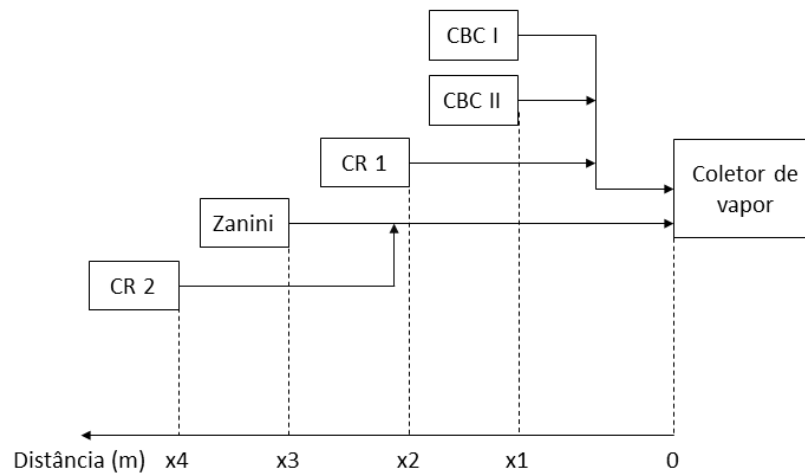
O segmento industrial de papel e celulose é caracterizado como um setor eletrointensivo. Em 2013, ele foi o terceiro maior consumidor de energia entre os diferentes setores industriais do Brasil [1]. Além disso, a indústria de papel e celulose possui um consumo elevado de vapor d'água, usado principalmente nas etapas de aquecimento de processos, secagem e geração de potência mecânica em turbinas a vapor [2]. Existe uma necessidade de aprimorar continuamente a eficiência energética das unidades fabris, seja pela base da geração de energia elétrica no país que é majoritariamente a partir de fontes hidráulicas e depende do regime de chuvas, seja pelo interesse em manter a competitividade da indústria ao disponibilizar excedentes para o mercado. Considerando o cenário de cogeração já presente na maioria das fábricas que produzem celulose de mercado e fábricas integradas [2], melhorias no processo de geração de vapor propiciam não somente economia no consumo de combustíveis utilizados, mas também aumento no excedente de energia elétrica.

O grupo Suzano é o 2º maior produtor mundial de celulose de eucalipto e 4º maior produtor mundial de celulose de mercado [3]. A unidade localizada em Suzano - SP, a 55 km da cidade de São Paulo, possui capacidade para produzir 43.4% da celulose do grupo e 11.4% do papel. Três tipos diferentes de caldeiras compõem a unidade responsável pela geração de todo o vapor utilizado na cadeia do processo: caldeira de recuperação, caldeira a gás e caldeira de biomassa. A Tabela 1 abaixo apresenta os tipos e quantidades de cada caldeira presentes na Unidade B da Suzano. Todas as caldeiras produzem vapor de alta pressão (VAP) a 45 kgf/cm<sup>2</sup>:

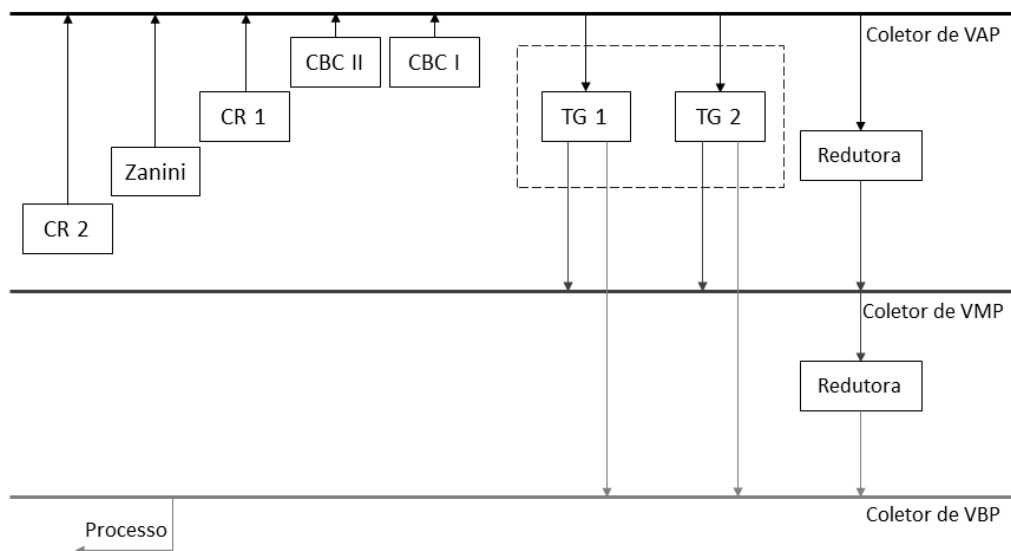
**Tabela 1. Informações sobre as caldeiras.**

Tipo	Combustível	Quantidade	Nomes	Capacidade
Caldeira de Recuperação	Licorpreto	2	CBC3 (CR 2)	180 ton/h
			Götaverken (CR 1)	90 ton/h
Caldeira a Gás	Gás Natural	2	CBC I	90 ton/h
			CBC II	90 ton/h
Caldeira de Biomassa	Biomassa reciclada e rejeitos de Eucalipto (pó, casca e finos)	1	Zanini	90 ton/h

A Figura 1 abaixo esquematiza a localização de cada caldeira com relação ao coletor único de vapor, que distribui a vazão total produzida para o processo:



**Figura 1. Representação ilustrativa da distância de cada caldeira com relação ao coletor de vapor de alta pressão (VAP).**



**Figura 2. Representação simplificada dos coletores de vapor de alta pressão (VAP) a 45 kgf/cm<sup>2</sup>, de média pressão (VMP), a 12 kgf/cm<sup>2</sup>, e de baixa pressão (VBP), a 5 kgf/cm<sup>2</sup>, além dos equipamentos presentes entre eles.**

Devido a esse posicionamento, oscilações na pressão do vapor produzido nas caldeiras a gás são as que mais afetam a pressão de vapor do coletor; as caldeiras de recuperação e de biomassa, por estarem mais afastadas, geram menos distúrbio no coletor.

### 1.1 Operação das caldeiras

Cada caldeira possui uma dinâmica diferente de combustão: a caldeira a gás possui resposta mais rápida diante de variações na demanda de vapor, já que o seu combustível é um gás de composição pura e com maior poder calorífico, se comparado ao licor preto e ao eucalipto. A eficiência da combustão na caldeira de biomassa depende da variabilidade da composição da matéria-prima; já a caldeira de recuperação, em geral, não possui muita margem para modulação no balanço de vapor e produz da forma mais constante possível, por causa das características do equipamento e do combustível [4]. Entretanto, o gás natural é o mais caro das opções energéticas, enquanto que a biomassa apresenta custo baixo e o licor preto, um valor desprezível diante das outras opções.

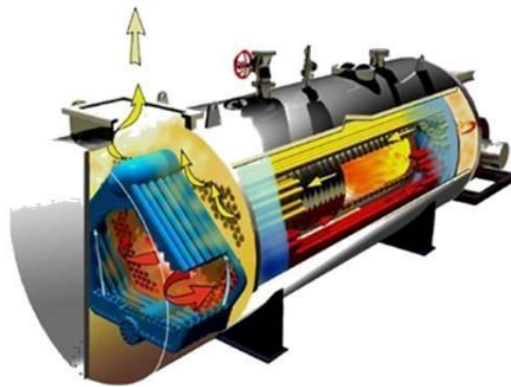


Figura 3. Exemplo de caldeira a gás natural. [5]

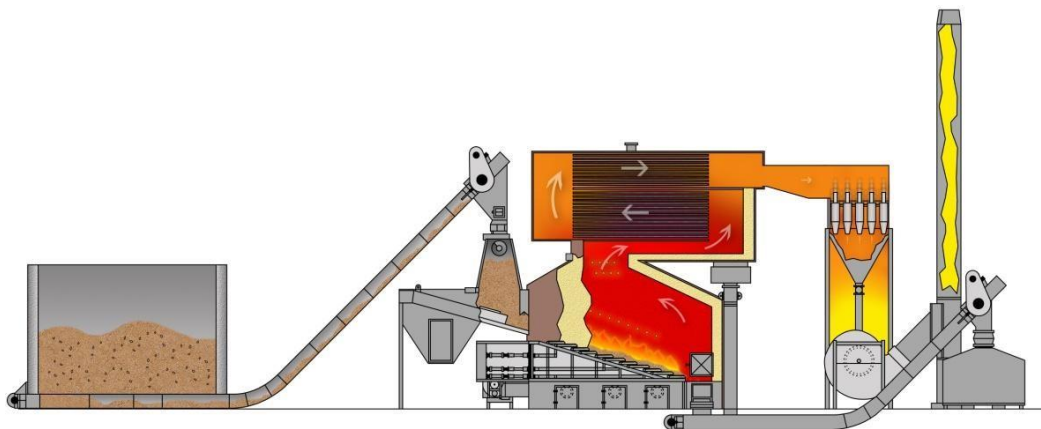
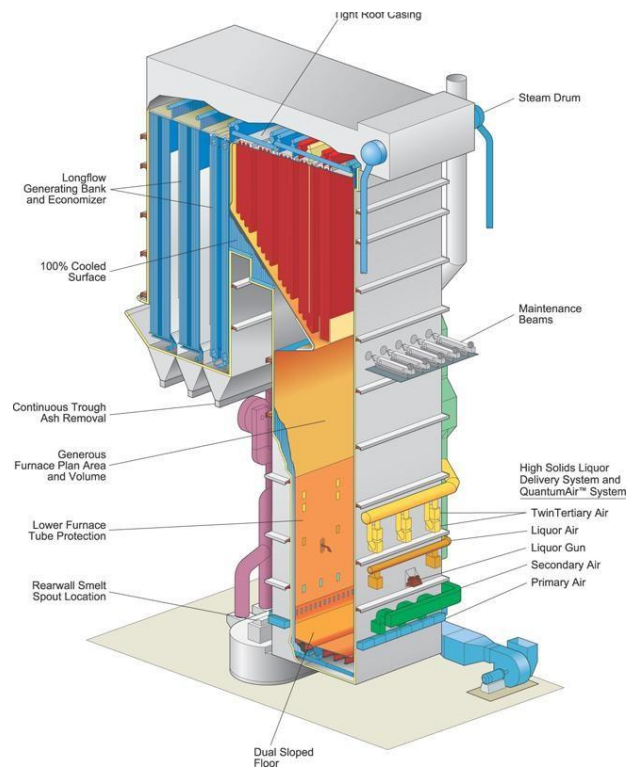


Figura 4. Exemplo de caldeira de biomassa. [6]

A cogeração é feita através de duas turbinas em paralelo de contrapressão, que reduzem o vapor para média pressão (VMP) através da extração, ou para baixa pressão (VBP) através do escape. No quadro de distribuição de vapor, existem também válvulas redutoras que interligam os coletores de média e de baixa pressão ao coletor de alta pressão. A geração de energia elétrica opera com paridade térmica, pois esta é consequência da demanda de vapor no processo [4].



**Figura 5. Exemplo de caldeira de recuperação. [7]**

Os consumidores de vapor exercem papel fundamental na distribuição de vapor e, conseqüentemente, na geração de energia. O vapor d'água é considerado um fluido compressível, pois ele sofre variação no volume em resposta a uma variação de pressão. Essa característica influencia diretamente na transferência de movimento deste fluido, de acordo com os princípios de conservação de massa, energia e momento. Uma mudança em uma propriedade contínua de um fluido deve ser igual à diferença entre as entradas e as saídas de um volume de controle, neste caso de um fluido em movimento, mais o que é criado ou consumido dentro do volume, por meio de reações químicas. Estas informações podem ser sumarizadas em equações de momento (Navier-Stokes), que apresentam relação inversa entre a velocidade do fluido e a pressão. Considerando que demandas de vapor pelos principais consumidores geram mudanças na vazão do fluido, quedas na pressão são esperadas para casos de maior demanda e vice-versa.

Além desse monitoramento da relação pressão/vazão de vapor, o controle das caldeiras deve manter a qualidade da combustão, o que pode ser indicado pelo teor de oxigênio em excesso próximo do *setpoint* de operação. Existe uma estratégia de Automação chamada de Estratégia de Controle por Limite Cruzado (Controle Seletivo), que é um intertravamento lógico de segurança cujo intuito é de prevenir que a vazão de ar de combustão se torne menor que a vazão de combustível e que a vazão de combustível exceda a vazão de ar. [9] Dessa forma, o controle por limite cruzado privilegia o aumento ou a redução de um deles diante de distúrbios de processo, mas mantendo a proporção necessária.

Nesta estratégia, seleciona-se para o *setpoint* do controlador da vazão de ar o maior sinal entre a demanda de energia necessária para corrigir o distúrbio de pressão/temperatura e a necessidade de ar proveniente da medição atual de vazão de gás. Para o controlador da vazão de gás natural, o *setpoint* é o menor sinal entre a demanda de energia e a necessidade de gás proveniente da medição atual de ar.

## 1.2 Lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy permite que estados indeterminados possam ser quantificados. Dessa forma, conceitos abstratos como quente, muito frio, pouco alto, etc. podem ser processados por um computador. Apesar de lidar com conceitos abstratos, não é possível ver uma clara distinção entre os estados ou qualificações. Temos então, um problema de classificação.

Por exemplo, considera-se a informação humana sobre um nível de reservatório de água (baixo, elevada, etc.): a transição entre os estados é apresentada na Figura 6 como um gradiente, a partir do qual não é possível afirmar exatamente onde um estado termina e outro começa. Também é possível categorizar um valor como algo que pertence a ambos estados (com diferentes intensidades) ao mesmo tempo.

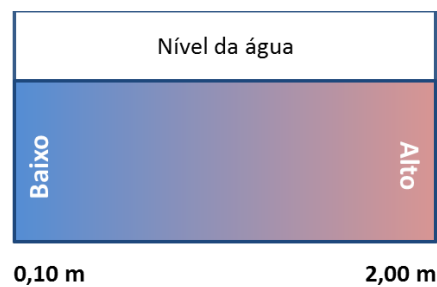


Figura 6: Gradiente de transição entre os estados em relação a um nível do tanque de água.

Simplificando, pode-se considerar que um nível de 0,10m é 100% baixo e 0% alto. Da mesma forma, um nível de 2,00m é 0% baixo e 100% alto. Dessa maneira, por exemplo, os níveis de 0,48m e 1,62m são classificados como:

- Nível de 0.48m é 80% baixo e 20% alto;
- Nível de 1.62m é 20% baixo e 80% alto;

Esta porcentagem de classificação é chamada de pertinência e é geralmente identificada pela letra grega  $\mu$  (mi).

A primeira parte do controle Fuzzy é a classificação das variações em rótulos que indicam sua intensidade e sentido em relação ao *setpoint*. Um rótulo (também chamado de **triângulo**) é um estado que irá definir uma faixa de valores (como alto e baixo, quente e frio). A Figura 7 apresenta as pertinências relacionadas ao exemplo do tanque de água.

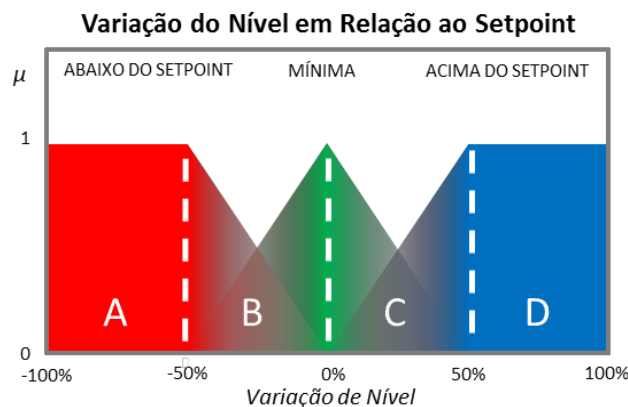


Figura 7: Classificação do erro do nível em relação ao *setpoint*.

Por exemplo, variações próximas do *setpoint* são rotuladas **mínimas**. No *setpoint* (onde a variação é igual a 0%), o valor é classificado unicamente como **mínimo** (100% mínimo). Pela mesma definição, quanto maior for a variação, menos sentido faz o rótulo de mínimo, e, portanto, menos peso ele recebe. Variações com módulos maiores que 50% deixam de ser consideradas mínimas (0% mínimo).

De modo similar as variações abaixo de 0% são rotuladas como **abaixo do *setpoint*** e as variações acima de 0% são rotuladas como **acima do *setpoint***. Assim sendo, uma variação de -25% é classificada ao mesmo tempo como mínima (50% mínima) e abaixo do *setpoint* (50% abaixo).

Supondo agora que no exemplo do tanque exista uma válvula atuadora que regule a entrada de água nele e a qual se deseja manipular a fim de estabilizar o nível. É possível classificar o fluxo de entrada de água no tanque da mesma forma:

- Um fluxo entre 0% e 25% é considerado mínimo;
- Um fluxo entre 25% e 50% é rotulado como mínimo e nominal. Quão mais próximo de 50% menos o fluxo é considerado mínimo;
- Um fluxo entre 50% e 75% é rotulado como nominal e máximo. Quão mais próximo do 75% menos o fluxo é considerado nominal;
- Um fluxo entre 75% e 100% é considerado máximo.

Após a definição dos rótulos, o controlador Fuzzy utiliza um conjunto de regras para, a partir dos dados do nível do tanque (entrada), regular o fluxo de água (saída) no mesmo. A Tabela 2 ilustra um conjunto de regras criadas para controlar o nível do tanque:

**Tabela 2. Regras de controle para o tanque de água.**

	Nível da água (Entrada)	Abertura de válvula (Saída)
Regra	Rótulo	Rótulo
1	Abaixo do <i>Setpoint</i>	Máximo
2	Mínimo	Nominal
3	Acima do <i>Setpoint</i>	Mínimo

Para entender como as regras funcionam, deve-se analisar a regra nomeada de 01. Por ela, quanto mais a variação do nível em relação ao *setpoint* for rotulada como abaixo do *setpoint* mais devemos considerar (ou "acionar") a intensidade da abertura da válvula como máximo.

Uma variação no valor medido pelo sensor em relação ao seu *setpoint* pode acionar vários rótulos ao mesmo tempo em diferentes intensidades. Isto faz com que várias regras sejam acionadas simultaneamente, o que, conseqüentemente, levam a uma saída com vários rótulos acionados com intensidades diferentes.

Cada regra Fuzzy descreve um conjunto de características do sistema em determinada situação, então é esperado que, quanto menor a resolução das regras, menos informações estarão mapeadas e, conseqüentemente, o controle será menos preciso em sua atuação. Acrescentando mais regras ao controle podemos descrever comportamentos mais complexos para as diferentes situações das variáveis.

## 2. METODOLOGIA

Com o intuito de aprimorar o rendimento do parque de caldeiras e estabilizar o coletor de vapor, a plataforma de controle avançado Leaf ("Learning Fuzzy") baseado em lógica Fuzzy foi aplicada para controle da combustão das caldeiras a gás e de biomassa, substituindo o controle tradicional existente (PID). A estratégia considera o fluxo de vapor da planta para antecipar as variações no consumo antes que a pressão seja impactada.

O processo de implantação do Leaf pode ser descrito de acordo com as seguintes etapas. Elas iniciam desde o momento de análise e adequação da automação, até a ativação do Leaf:

1. Adequação da automação: criação de lógica de segurança e botão de liga/desliga para a operação. Coleta dos endereços das tags OPC, além de testes de leitura e de escrita **(2 dias)**. Abaixo, na Figura 8, é possível visualizar os ajustes feitos no supervisório pela equipe de automação da Suzano.



Figura 8: Interface de acionamento do controle Leaf no supervisório

2. Análise do processo e da operação **(dois dias - realizada simultaneamente com a etapa 1)**
3. Elaboração da estratégia de controle, baseada em entrevistas com a operação. Ajustes em malha aberta **(dois dias)**
4. Ativação do Leaf. A partir desta etapa, o Leaf passou a atuar nas caldeiras a gás e de biomassa, seguindo um padrão de alternância de ligar o controle avançado a cada dia.

A Figura 9 abaixo mostra a estratégia simplificada de controle implantada nas caldeiras a gás e de biomassa:

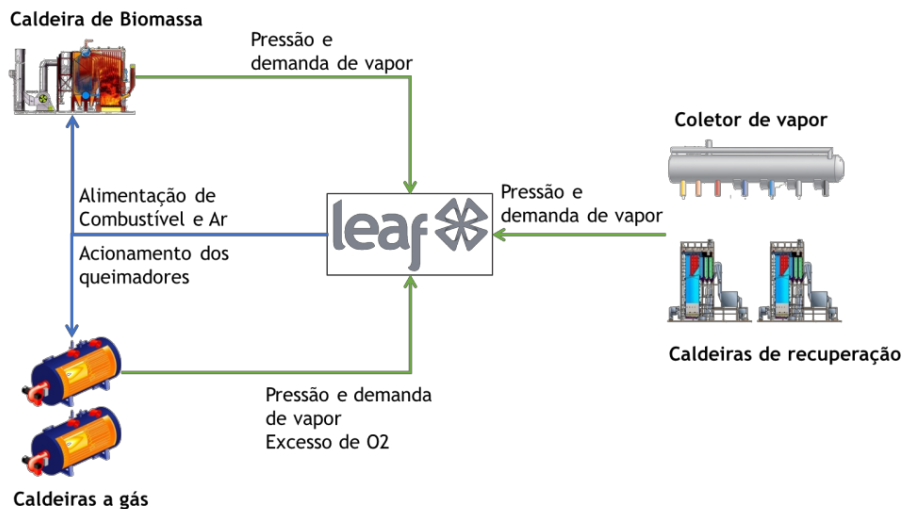


Figura 9. Estratégia de controle aplicada.

A estratégia de controle da caldeira a gás incorporou uma metodologia adaptada de limite cruzado para manter a qualidade da combustão. Nesta situação, o controle por limite cruzado incorporou a pressão do vapor e excesso de oxigênio na combustão como variáveis de distúrbio. A partir da demanda de vapor das caldeiras CBC1 e CBC2, é realizada uma distribuição de carga entre as caldeiras de maneira a aproveitar a diferença de eficiência entre elas. Uma vez definida a distribuição de carga, o controle de combustão se encarrega de atingir

a produção de vapor respeitando as restrições de queima (relação ar/gás) e de pressão (variação no coletor principal).

As caldeiras a gás respondem rapidamente aos picos de demanda de vapor do processo, de forma a evitar quedas bruscas na pressão de vapor do coletor. Quando possível, o Leaf também reduz a geração de vapor das caldeiras a gás, para que a produção das caldeiras de biomassa seja capaz de suprir a demanda. Esse gerenciamento de produção é realizado assim que a pressão de vapor apresenta melhorias na estabilidade, pois a caldeira de biomassa possui resposta de atuação mais lenta.

A estratégia de controle da caldeira Zanini incorporou lógica semelhante à das caldeiras a gás. Devido a sua característica de resposta mais lenta, o controle privilegia a operação com pressão elevada e estável, antecipando variações no coletor para evitar alívio de vapor por sobrepessão. De forma assimétrica na sua atuação, o controle deve evitar responder agressivamente às quedas na pressão de vapor, pois sua distância do coletor torna difícil a recuperação da produção.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Leaf reduziu a oscilação da pressão de vapor do coletor em 31%, mantendo este resultado ao longo de horas de operação, conforme Figura 9.. A estabilização dessa pressão resultou na oportunidade de reduzir a operação com a caldeira a gás e aumentar a produção usando a caldeira de biomassa, que possui dinâmica mais lenta de resposta:

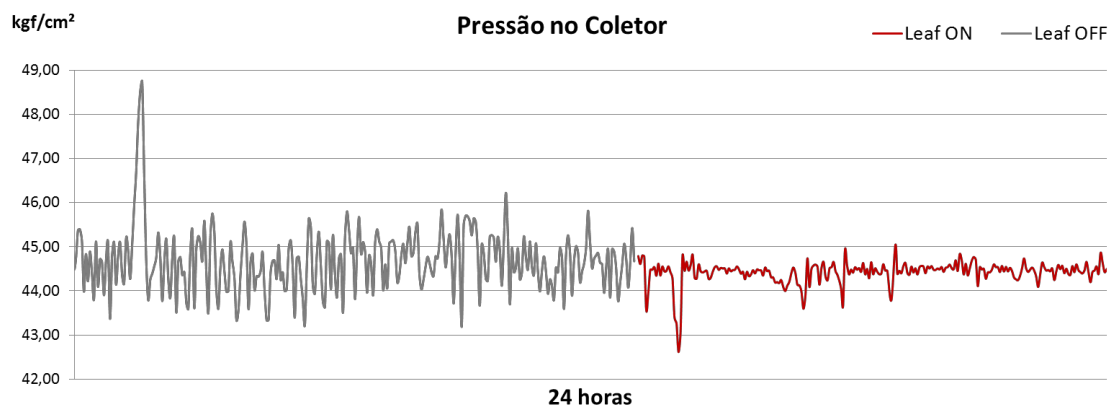


Figura 10. Gráfico da pressão no coletor após da nova estratégia de controle.

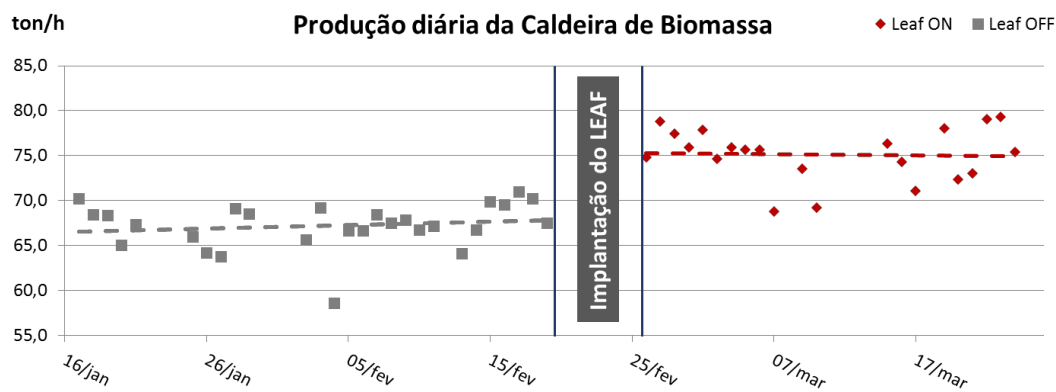


Figura 11. Geração de vapor da caldeira de biomassa.



A estratégia adotada permitiu que o Leaf antecipasse a ação das caldeiras a gás quando necessitava de respostas rápidas para evitar oscilações na pressão de vapor, para que a caldeira de biomassa assumisse com maior frequência nos períodos de estabilização. Como consequência de uma maior participação da caldeira de biomassa, os custos relacionados à geração de vapor foram reduzidos, sem que a produção fosse alterada.

Durante o período de avaliação do Leaf, 7 ton/h de vapor deixaram de ser produzidas nas caldeiras a gás e passaram a ser produzidas na caldeira de biomassa, **gerando um ganho financeiro de R\$ 1,5 milhão ao ano para a Suzano.**

#### 4. CONCLUSÃO

A aplicação exposta nesse trabalho levantou a discussão de aplicação de controle avançado baseado em lógica Fuzzy (através do Leaf) em processos comuns da indústria. A implantação foi capaz de gerar ganhos significativos na base instalada do parque de caldeiras da Suzano, sem necessidade de mudanças estruturais no processo e em um curto espaço de tempo.

A plataforma de lógica Fuzzy utilizada apresentou duas grandes vantagens: adaptabilidade e independência de modelagem de processo. Essas características permitiram que a aplicação fosse realizada sem a necessidade de modelar o sistema. Esse tipo de abordagem garantiu velocidade na entrega dos resultados obtidos, com risco mínimo a execução do projeto.

#### AGRADECIMENTOS

*Agradecemos à equipe Suzano e I.Systems que contribuiu com este trabalho dedicando tempo, esforço e conhecimento.*

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martin, C. "Eficiência Energética," em Revista O Papel, edição de setembro, pp.32-38. (2013)
2. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). "Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados - Celulose e Papel," CGEE, Brasília, pp. 41-56. (2013)
3. Suzano Papel e Celulose. "Suzano – Capacidade de Produção", disponível em: <http://ri.suzano.com.br/static/ptb/capacidade-de-producao.asp?language=ptb>, acessado em 07 de abril de 2015. (2015)
4. Moraes, F. A. B.; Piratelli, C. L. "Distribuição de vapor e energia elétrica na indústria de celulose e papel", Centro Universitário de Araraquara (UNIARA). (2011)
5. Par Techno-Heat Pvt. Ltd. "LDO/ FO (Capital)/ Natural Gas/ Producer Gas Fired, 3 Pass, Horizontal Smoke Tube Tubular Wet Back Packaged Steam Boiler", disponível em: [http://www.parboiler.com/natural\\_gaspass.html](http://www.parboiler.com/natural_gaspass.html), acessado no dia 09 de abril de 2015. (2015)
6. Wellons Fei Corp. "Biomass Boiler," disponível em: <http://www.wellonsfei.ca/en/biomass-boiler.aspx>, acessado no dia 09 de abril de 2015. (2015)
7. The Babcock & Wilcox Company. "Process Recovery Boiler," disponível em: <http://www.babcock.com/products/Pages/Process-Recovery-Boiler.aspx>, acessado no dia 09 de abril de 2015. (2015)
8. Ferreira, F.O. "Estudo do Sistema de controle de caldeiras de centrais termoeletricas," pp.22-30, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. (2008)