

OTIMIZAÇÃO DA MALHA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA EM USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL ATRAVÉS DE INSTRUMENTAÇÃO

GIANCARLO CITTADINO*, FUAD KASSAB JUNIOR*, ARY FRANCO JUNIOR+

*LAC, ESCOLA POLITÉCNICA, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
AV. PROF. LUCIANO GUALBERTO, 380 - BUTANTÃ, SÃO PAULO - SP, 05508-010

+INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
AV. DO UNIVERSITÁRIO, 145 - JARDIM IPIRANGA, TUPÃ - SP, 17607-220

E-MAILS: GIANCARLOCITTADINO@HOTMAIL.COM; FUAD@LAC.USP.BR; ARYFRANCO@HOTMAIL.COM

Abstract — The sugarmill have a great potential for electricity production through burning bagasse that can be better used . The article will propose an alternative to improve the efficiency of burning through the use of flow meters and moisture bagasse instruments, furthermore a better detail in the mesh control input variable.

Keywords — Cogeneration , Instrumentation , Control, Moisture , Bagasse.

Resumo — As usinas de açúcar e álcool possuem um grande potencial de produção de energia elétrica através do melhor aproveitamento da queima de bagaço. Este artigo propõe uma alternativa para aperfeiçoar a eficiência da queima por meio da utilização de medidores de vazão e umidade do bagaço, além de um melhor detalhamento na variável de entrada do controle da malha.

Palavras-chave — Cogeração, Instrumentação, Controle, Umidade, Bagaço.

1 Introdução

O Balanço Energético Nacional - BEN 2015, do Ministério de Minas e Energia (MME), apresenta um resumo da oferta de energia no Brasil. Neste estudo, é possível verificar o aumento de produção de energia no ano de 2014, atingindo o montante de 590,5TWh. De acordo com o relatório citado, é possível verificar que a maior fonte de energia produzida no país é proveniente das hidroelétricas (70,6%), seguido pelo gás natural (11,3%) e pela energia produzida através da biomassa (7,6%), conforme figura 1. Se considerarmos as fontes de energia disponíveis, é possível afirmar que a matriz energética brasileira baseia-se fundamentalmente nas fontes renováveis, uma vez que correspondem a 78,2% da oferta interna de energia (M.M.E., 2015).

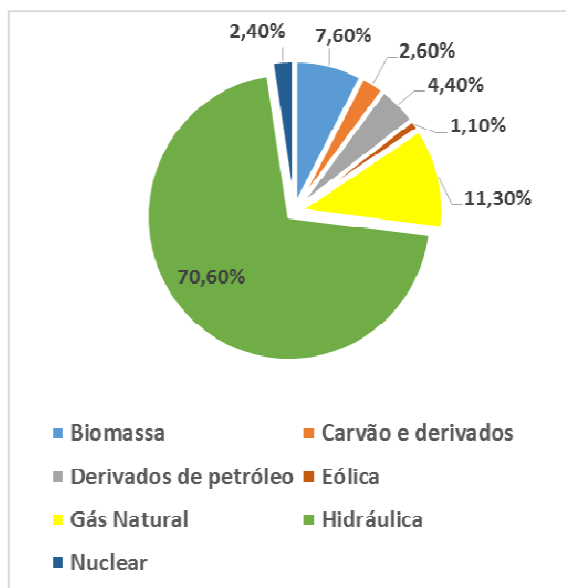


Figura 1. Oferta interna de energia elétrica por fonte (M.M.E., 2015).

Na projeção para os próximos anos, a matriz energética continuará a se basear nas energias renováveis, o que contribuirá para o desenvolvimento sustentável do país e ajudará a reduzir as taxas de emissão de carbono (M.M.E., 2014). A figura 2, indica a diminuição na participação de usinas termo elétricas (UTE) e usinas nucleares.

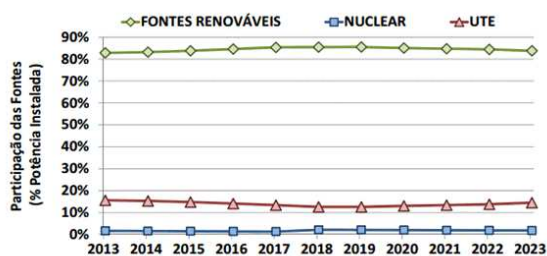


Figura 2. Projeção da participação de tipos de energia na matriz energética brasileira, durante os próximos anos (M.M.E., 2014).

Uma forma de produzir energia através da biomassa utilizada no Brasil é a partir da utilização da cana de açúcar. Embora esta forma apresente um grande potencial energético, ainda é pouco utilizada em nosso país (Dantas, 2010).

Cerca de um terço da energia solar absorvida pela cana de açúcar é absorvida e fixada como açúcar e o restante dessa energia corresponde à fibra vegetal, que é composta de celulose, hemicelulose e lignina, constituindo o bagaço e a palha (B.N.D.E.S., 2008).

A biomassa proveniente da cana de açúcar é consumida na produção de açúcar e de etanol quase na sua totalidade. De acordo com dados do BEN, em 2014, aproximadamente 58% das 138 milhões de toneladas de bagaço consumidas para fins energéticos são provenientes da produção de açúcar, sendo que o restante foi obtido após a produção de etanol (M.M.E., 2015). A perspectiva é de uma alteração do cenário atual, com relação à utilização da cana de açúcar para a produção da biomassa, pois o mercado de combustíveis renováveis, que ascenderá ainda mais até 2023 de acordo com o PDE 2023 (plano decenal de expansão de energia) (M.M.E., 2014).

Introduzida no Brasil no início do século XVI, a cana de açúcar é utilizada quase que integralmente para a geração de energia térmica, elétrica e é produtora de combustíveis líquidos (Dantas, 2010). Impulsionado por novas tecnologias, o setor canavieiro ganhou grande destaque nas últimas décadas, a partir de 2003 o Brasil se transformou no maior laboratório de produção de biocombustíveis do mundo (Oliveira M., 2013).

Os processos para a separação do caldo da cana e do bagaço são: Moagem ou Difusão. Na Moagem, a extração é feita por pressão mecânica dos rolos compressores da moenda sobre a cana de açúcar disposta de uma maneira a formar um colchão. Entre as moendas, é realizada a adição de água para que seja possível a retirada de toda a sacarose da biomassa restante. Na Difusão há um processo de deslocamento da cana desintegrada por um fluxo de água na direção contrária, com o intuito de que a sacarose adsorvida nas fibras da cana seja diluída e retirada por lavagem ou lixiviação (Mezaroba, 2010).

Para cada tonelada de cana moída na produção de etanol são obtidos cerca de 730 kg de caldo de cana, sem considerar a água envolvida no processo (M.M.E., 2015), aproximadamente 250 kg de bagaço

da cana e o restante do processo é considerado como palha e biogás (Pellegrini, 2002).

A demanda de bagaço de cana tem crescido em torno de 3,3% anualmente e, segundo o PDE2023, se comportará de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Projeção da demanda de bagaço (M.M.E., 2014).

Ano	Setor Industrial	Setor Energético	Total
	mil toneladas		
2014	81.271	55.614	136.885
2018	87.261	75.101	162.362
2023	95.094	94.910	190.004
Período	Variação no período (mil ton)		
2013-2023	15.396	36.096	51.492

O bagaço é uma energia renovável com participação superior a 74% em relação a outras biomassas e apresenta custo de produção favorável se comparado a outras fontes de energia. Seria possível agregar 4000 MW de energia na malha de energia nacional com as instalações atuais das usinas, sendo que a quantidade poderia ser aumentada para mais 9000 MW caso as produções fossem modernizadas. Diante disso, essa fonte de energia apresenta-se como potencial latente, pois pode se transformar em uma alternativa da matriz energética do Brasil (Siloni, 2008).

Poder Calorífico é a quantidade de combustão que 1 kg de combustível pode oferecer, subdividido em: PCS (Poder Calorífico Superior) e PCI (Poder Calorífico Inferior). O último, por fornecer uma ideia mais precisa do calor obtível, deve ser adotado como referência através da seguinte fórmula:

$$PCI = PCS - 600.E_{pv} \quad (1)$$

Considera-se E_{pv} como: peso do valor de água presente nos gases provenientes da combustão de 1 kg do combustível selecionado (Oliveira C., 2013).

Segundo o Guia da ANEEL (agência nacional de energia elétrica) de 1998, a média do PCI proveniente do bagaço da cana é de 7,53 MJ/kg, mas pode variar de acordo com as condições de umidade, como demonstrado na Tabela 2:

Tabela 2. Poder calorífico do bagaço e da palha (Pellegrini, 2002).

Insumo	Teor de umidade (%)	Poder calorífico (Mj/kg)
Bagaço	50	7,53
Bagaço	15	13,70
Pontas e folhas	50	7,54
Pontas e folhas	20	12,56
Pontas e folhas	15	13,70

Outras características importantes da utilização do bagaço como combustível nas usinas são: energia útil contida no vapor gerado de 4,79 MJ/kg; produção de vapor de 1,9 kg de vapor/ kg de bagaço; Poder Calorífico Inferior (PCI) no bagaço úmido de 7,53 MJ/kg; PCI após a secagem de 10,56 MJ/kg (Oliveira C., 2013). Como referência de mercado, o PCS utilizado para o bagaço é de 4600 kcal/kg, pois há um baixo nível de variação dos diversos bagaços de canas provenientes de todas as espécies da cana de açúcar (Oliveira C., 2013).

2 Cogeração

No processo de cogeração, o bagaço sai normalmente das moendas com umidade de 48% a 52%, e é transportado até as caldeiras através de esteiras para alimentar os dosadores de bagaço. A alimentação da caldeira normalmente é do tipo *spreader-stoker*, que consiste em uma alimentação de bagaço e ar, através de um ventilador, que possibilita maior queima do bagaço em suspensão. Essa queima permite resposta rápida a possíveis variações de cargas. Por fim, as grelhas garantem a queima do restante do bagaço (Ribeiro, 2003).

O uso de pré aquecedores de ar e do economizador, permite mais eficiência da caldeira, aproveitando o calor gerado pelos gases da saída da fornalha. O pré aquecedor é responsável por aquecer o ar de combustão e o economizador fornece energia térmica para elevar a temperatura da água de alimentação. Os sopradores de fuligens são montados em pontos estratégicos da caldeira para melhorar a eficiência total do feixe tubular, evitando a permanência de fuligens entre seus tubos. O lavador de gases na saída da fornalha permite que o gás da chaminé seja limpo, evitando que particulados sejam jogados para a atmosfera (Ribeiro, 2003).

Após a saída do vapor da caldeira, seu transporte ocorre através de tubulações isoladas termicamente até as turbinas. Essas máquinas transformam a energia contida no vapor em energia mecânica para os geradores elétricos e também fornecem vapor de baixa pressão para o processo de acordo com as necessidades da usina (Ribeiro, 2003).

O gerador elétrico, que fica acoplado junto à turbina, transforma a energia mecânica recebida em energia elétrica para uso da própria usina. Quando existe excedente, vende-se essa energia para o mercado (Ribeiro, 2003). Todo esse processo é possível de ser verificado na Figura 3.

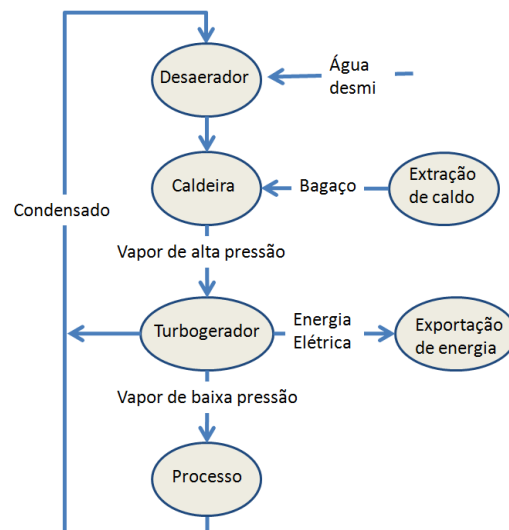


Figura 3. Representação da cogeração de energia simplificada.

Todo o processo é instrumentado para a verificação, controle e segurança da cogeração. São encontrados diversos medidores de temperatura, pressão e vazão para as variáveis: vapor e água. Usualmente, a vazão de entrada de bagaço na caldeira é medida através da rotação da esteira de alimentação, o que gera imprecisão no valor observado. Já a umidade, é medida uma vez ao dia, pelo laboratório, sendo que esse valor não é uma variável de entrada do sistema de controle dessa malha.

Este artigo propõe incluir a medição de vazão e umidade de bagaço, para que seja possível a leitura *online* de suas características. Para isso, esses instrumentos devem ser instalados na esteira de entrada de bagaço que alimenta a caldeira, de acordo com as proposições de cada fornecedor, além de serem interligados ao controlador da planta. Os instrumentos verificarão qualquer alteração na quantidade e qualidade de bagaço que entra na caldeira, influenciando diretamente na produção de vapor e, consequentemente, na vazão de bagaço a ser utilizado pelo processo.

O instrumento proposto para ler a umidade aplica um campo eletromagnético ao bagaço e analisa as perturbações provocadas, correlacionando-as ao teor de umidade do produto. A tecnologia utilizada aplica um campo com frequência de 5Hz no produto para realizar a leitura, e torna-se possível medir, não somente, a umidade superficial do material, mas também a umidade interna do produto, seguindo a norma NBR14929 (Marrari, 2016).

Já o medidor de vazão, digitaliza o conteúdo da esteira, varrendo continuamente o bagaço, com o intuito de registrar o perfil do material transportado. Esta informação, em conjunto com um gerador de sincronismo, envia a vazão do material transportado para o sistema de controle (Marrari, 2016).

3 Modelo

Astrom & Bell desenvolveram o modelo não linear de caldeira mais utilizado nos dias atuais, que descreve a dinâmica dos elementos principais da caldeira. Tal modelo foi testado durante um longo período operacional, apresentando-se de maneira eficaz a representar o conjunto de equipamentos (Astrom & Bell, 2000). Os autores Oliveira Junior (2009) e Franco Junior (2012) propõem linearização para o modelo de Astrom & Bell controlar a caldeira conforme equações:

$$x(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]' = [V_{wt} \ p \ \alpha_r \ V_{sd}]' \quad (2)$$

$$u(t) = [u_1 \ u_2]' = [q_f \ Q]' \quad (3)$$

$$E(x(t)) \cdot \dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) \quad (4)$$

$$E(x(t)) = \begin{bmatrix} e_{11}e_{12} & 0 & 0 \\ e_{21}e_{22} & 0 & 0 \\ 0 & e_{23}e_{33} & 0 \\ 0 & e_{24}e_{34} & e_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} q_f - q_s \\ Q + q_f h_f - q_s h_s \\ Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{(h_f - h_w)}{h_c} q_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

Considera-se entradas da matriz U a vazão de água de alimentação, q_f , e o calor fornecido para a caldeira, Q. A Tabela 3 descreve todas as variáveis utilizadas no modelo.

Tabela 3. Variáveis do modelo (Franco Junior, 2012).

Variável	Descrição	Unidade
α_r	Qualidade do vapor	-
h_c	Entalpia da condensação	J/Kg
h_f	Entalpia específica da água de alimentação	J/Kg
h_s	Entalpia específica do vapor	J/Kg
h_w	Entalpia específica da água	J/Kg
p	Pressão dentro do tubulão	Pa
Q	Quantidade de calor da fornalha	W
q_{dc}	Vazão de água não evaporada nos tubos de descida da caldeira	Kg/s
q_f	Vazão de água na entrada da caldeira	Kg/s

q_r	Vazão de água quente na subida para o tubulão	Kg/s
q_s	Vazão de vapor na saída da caldeira	Kg/s
T_d	Tempo de resistência do vapor no tubulão	°C
V_{sd}	Volume de vapor abaixo da água no tubulão	m³
V_{sd0}	Volume de vapor abaixo da água no tubulão inicial	m³
V_{st}	Volume total de vapor do sistema	m³
V_{wt}	Volume total de água do sistema	m³
ρ_s	Densidade específica do vapor	Kg/m³

De acordo com os trabalhos de Oliveira Junior (2009) e Franco Junior (2012), a eficiência do modelo proposto por Astrom & Bell em cogerações de usinas de açúcar e álcool é comprovada.

O primeiro faz uma descrição detalhada de todos os modelos existentes para esse tipo de processo. Já o segundo, propõe um controle diferenciado frente aos encontrados na maioria das usinas aplicando uma lógica *fuzzy* com o projeto baseado em LMIs (*Linear Matrix Inequality*) para garantir a estabilidade do sistema.

4 Melhoria no modelo para usinas

O controle mais usual da produção de vapor de uma caldeira é chamado de "Controle de Nível a Três Elementos", entretanto ele não é o mais eficiente. Esse controle é realizado através de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo), e uma lógica de soma e subtração, envolvendo as seguintes variáveis: a) nível da água do tubulão de vapor, b) vazão de vapor para consumo e c) vazão da água de alimentação. O procedimento de ajustes para cada um dos PID é realizado através do método de tentativa e erro, porém não existe a certeza de que o ponto de operação do sistema – definido quando a vazão mássica de água de alimentação da caldeira e a vazão mássica de vapor produzido são iguais – corresponda ao ponto ótimo da malha de controle de vapor. Outro fator que deve ser levado em consideração é que o PID é ajustado para trabalhar em um único ponto de operação da usina, porém ocorrem muitas mudanças no processo que demandam quantidade diferente de vapor produzido e consequentemente o PID não está ajustado para controlar esses outros pontos de operação (Franco Junior, 2012).

Nos cálculos descritos por Franco Junior, a entrada Q é obtida através de um valor fixo do PCI do bagaço e com uma medida estimada para a sua vazão,

visto que a usina estudada pelo autor não possui tais instrumentos que permitem exatidão da medida.

Este artigo propõe que seja implementada uma instrumentação que não é usual em usinas, composta por medição da vazão e da umidade do bagaço, ou seja, através dos instrumentos propostos, as condições de entrada do processo teriam medição *online*, o que proporcionaria melhor ajuste do algoritmo de Astrom & Bell e uma melhoria na eficiência do processo.

Através de simulações no software Matlab® reproduziu-se o comportamento do processo de cogeração de uma usina, utilizando o modelo descrito. Posteriormente, através do controlador descrito por Franco Junior, simulou-se o novo comportamento do processo, incluindo a medição de vazão e umidade de bagaço nos cálculos, em comparação aos resultados obtidos se o processo passasse por uma variação do tipo pulso no fornecimento de energia para o sistema.

Com a medição dessas variáveis é possível realizar uma adequação no modelo desmembrando a entrada Q em duas novas variáveis, dependentes uma da outra, conforme equação:

$$Q = PCI \cdot q_b \quad (7)$$

Considera-se a nova variável q_b como proveniente do medidor de vazão de bagaço e a variável PCI , através de uma correlação proporcional à umidade encontrada no bagaço, medida através do medidor de umidade. Os valores do PCI respeitam a equação 1, e serão tabelados no supervisão, através de uma escala com variações de 1% no valor medido da umidade conforme Tabela 4.

Tabela 4. PCI do bagaço para supervisão.

Insumo	Teor de umidade (%)	Poder calorífico (Mj/kg)
Bagaço	52	7,14
Bagaço	51	7,35
Bagaço	50	7,53
Bagaço	49	7,71
Bagaço	48	7,89

5 Simulações

As simulações realizadas com os dados do modelo descrito em Franco Junior (2012), mostram que a inclusão dos instrumentos no processo proporciona menor esforço do controle, e isso irá gerar a diminuição do consumo de bagaço na entrada do sistema. As figuras a seguir simulam o comportamento esperado do processo com e sem instrumentação na entrada da malha, através de uma variação de calor produzido gerada pela secagem do bagaço.

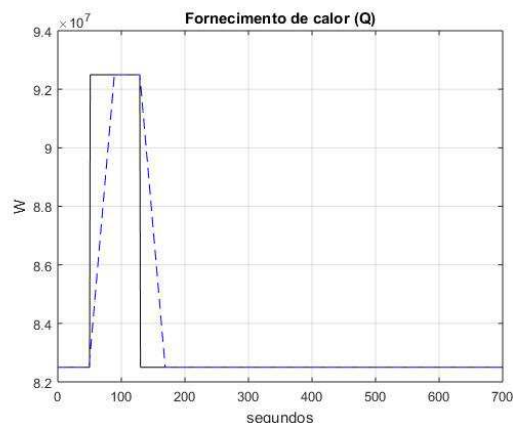


Figura 4. Representação da entrada sem instrumentação com linha contínua e com a instrumentação com linha tracejada.

Na Figura 4, a linha contínua mostra uma variação de fornecimento de calor de 10MW, que, sem a instrumentação, deve ser inserida como forma de pulso no sistema. Já a linha tracejada, simula a mesma variação que será percebida pelos instrumentos e terá o comportamento de uma rampa de subida e descida no sistema. Após os cálculos do software é possível verificar que o controle irá atuar de forma preditiva nas entradas do sistema:

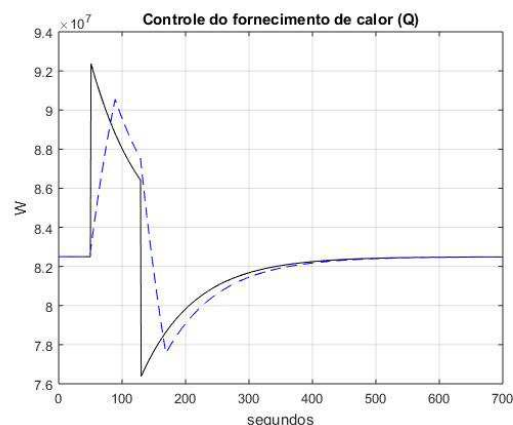


Figura 5. Representação do sistema controlado, na variável de fornecimento de calor Q , sem instrumentação em linha contínua e com a instrumentação em linha tracejada.

No controle de fornecimento de calor demonstrado na Figura 5, temos um pico de calor de 9,05MW, no sistema instrumentado, contra 9,23 MW sem a instrumentação. Dessa forma, o sistema ignora parte do aumento de calor proporcionado pelos novos dados de entrada (9,23MW) e voltando ao sistema estabilizado antes de $T=500$ segundos. Com esses dados, é possível verificar o sistema preditivo, atuando na esteira de entrada do bagaço, para proporcionar a economia no fornecimento da matéria prima.

Também é possível verificar que o sistema precisará de menos água para atuar sobre o novo valor de entrada de energia.

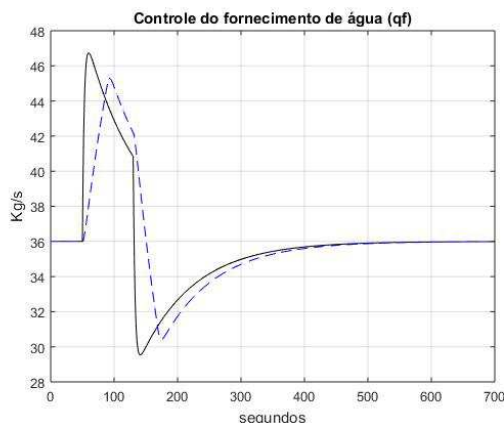


Figura 6. Representação do sistema controlado, na variável de fornecimento de água fria q_f , sem instrumentação em linha contínua e com a instrumentação em linha tracejada.

No fornecimento de água fria para o sistema, representado na Figura 6, há uma diminuição de 3% no pico máximo e mínimo de entrada necessária para estabilização e volta ao *set point*, proveniente da medição correta da quantidade de entrada de calor no sistema.

Os resultados obtidos comprovam que existe uma diminuição do esforço de controle, da quantidade de produtos inseridos no sistema e da perturbação que o sistema irá sofrer com relação as variáveis de entrada, quando da utilização da instrumentação na entrada do bagaço.

6 Conclusão

Através da utilização dos instrumentos propostos, aliados a alteração na entrada do controle da cogeração de usinas de açúcar e álcool, é possível melhorar a eficiência energética diminuindo a variação na saída de vapor da caldeira e utilizar menos bagaço e água para atender a demanda da planta. A economia de bagaço poderá auxiliar as usinas produtoras de etanol de segunda geração, que devem fazer *trade offs*, para verificar qual a melhor opção para a sua operação. É válido lembrar que todas as plantas buscam uma economia na utilização de água em seus processos.

Esse artigo abre a possibilidade de futuros trabalhos que consigam implementar as alterações propostas em uma usina em funcionamento, o que poderia comprovar na prática as medições obtidas pela simulação no software.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem a Marrari Automação Industrial Ltda. que forneceu dados sobre os instrumentos de vazão e umidade de bagaço.

Referências Bibliográficas

- ASTROM K.J. and BELL R.D. (2000). Drum-boiler dynamics. Artigo, Automatica, v.36, pp 363-378.
- B.N.D.E.S. (2008). Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável. Livro, Rio de Janeiro-RJ.
- DANTAS D.N. (2010). Uso da Biomassa da cana de açúcar para geração de energia elétrica: Análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. Dissertação, São Carlos-SP, USP.
- FRANCO JUNIOR A. (2012). Projeto e Simulação de um sistema de controle via LMIS da produção de vapor de uma caldeira aquatubular. Dissertação, Ilha Solteira – SP, UNESP.
- MARRARI (2016). Catálogos Técnicos. Curitiba-PR.
- MEZARROBA S.M., MENEGUETTI, C.C. e GROFF, A.M., (2010). Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema. IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. Artigo, Campo Mourão – PR, pp 10.
- M.M.E. (2014). Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. Relatório, Editora: EDP, Brasília-DF, p. 434.
- M.M.E. (2015). Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014. Relatório, Brasília-DF.
- PELLEGRINI M.C. (2002). Inserção de centrais cogeneradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: Exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locais e de integração energética. Dissertação, São Paulo – SP, USP.
- OLIVEIRA C.A (2013). Cogeração a partir do bagaço da cana de açúcar: histórico, situação atual e perspectivas para o setor. Dissertação, Sertãozinho – SP, UFSC.
- OLIVEIRA M.P. (2013) Cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar. Trabalho de conclusão de curso, Taquaritinga – DF, Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga.
- OLIVEIRA JUNIOR V.B. (2009). Modelagem de central termelétrica a vapor para simulação dinâmica. Dissertação, Vitória – ES, UFES.
- RIBEIRO P.R. (2003). A usina de açúcar e sua automação. Livro, Araçatuba-SP.
- SILONI J.R. (2008) Cogeração de Energia - Aproveitamento de matéria orgânica: um relato da realidade do grupo Cosan - unidade Rafard. Dissertação, Capivari – SP, FACECAP.