

ESTUDO DE UMA PLANTA HÍBRIDA DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

MARCELO MENEZES MORATO*, PAULO RENATO DA COSTA MENDES*, DOUGLAS WILDGRUBE BERTOL*, DANDARA CEMBRANEL*, CARLOS BORDONS ALBA†, JULIO ELIAS NORMEY-RICO*

**Departamento de Automação e Sistemas (DAS), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brazil*

†*Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain*

Emails: marcelomnzm@gmail.com, paulorcm@hotmail.com, dwbertol@gmail.com, dandaracembranel@gmail.com, bordons@esi.us.es, julio.normey@ufsc.br

Abstract— This paper presents a hybrid power generation plant. This system is placed inside a sugar cane processing plant, that produces sugar and ethanol, and subject to process demands, such as production of different pressurized steam flows. The system has, also, to provide the external network with electric power, due to a defined contract with local distributor. The system proposed in this paper is a new approach to hybrid generation with the recycling of the sugar cane remains as *biomass* and *biogas* combined with the use of renewable sources, such as photovoltaic panels and wind power turbines. The plant modeling is based on the *Energy Hubs* methodology, that allows such integration of different energy carriers in the same model, and aims to facilitate the future control of the proposed hybrid energy system. Simulation results show the satisfying operation of the studied microgrid.

Keywords— Modeling of Sugar Cane Power Plant, Renewable Sources, Energy Hubs, Microgrids.

Resumo— Este artigo apresenta a modelagem de uma planta híbrida de geração de energia. Este sistema pertence a uma usina de processamento de cana-de-açúcar para produção de etanol e açúcar e, então, é sujeito à demandas de processo, como à produção de diferentes vazões de vapor pressurizado. O sistema também deve produzir energia elétrica, definida por um contrato com a distribuidora local. O sistema proposto neste artigo é uma abordagem nova para geração híbrida de energia, com o reaproveitamento dos resíduos da cana-de-açúcar como *biomassa* e *biogás* junto com a inserção de fontes renováveis, como painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. A modelagem proposta para a planta de geração de energia é baseada na metodologia dos *Energy Hubs*, que permite integrar diferentes tipos de energia em um mesmo modelo, e tem como objetivo facilitar o futuro controle do sistema de geração híbrida proposto. Resultados de simulação mostram a operação satisfatória da planta estudada.

Palavras-chave— Modelagem de Planta de Geração de Energia na Indústria de Cana de Açúcar, Fontes Renováveis, Energy Hubs, Microrredes.

1 Introdução

O uso e a geração de energia elétrica de maneiras eficientes são assuntos chave para um futuro mais sustentável e ecologicamente amigável. Os alicerces da geração de energia estão mudando de maneira profunda (Johansson, 1993): os preços dos combustíveis fósseis sobem a cada ano (dada a escassez), as demandas energéticas aumentam em todos os países e a busca por fontes renováveis viáveis se torna cada vez mais importante (Shafiee, 2009). Com a iminente estrutura de plantas de geração de energia e calor distribuídas (Jiayi, 2008), geração de energia *limpa*, renovável será um assunto de grande importância no cenário energético dos próximos anos.

O maior problema relacionado a esse tipo de sistema é a desconfiança e inconstância da qualidade de fontes de energia renováveis, por estas serem intermitentes e causarem flutuações na saída de energia. Uma solução prática para este problema é a introdução de unidades de armazenamento de energia.

O Brasil tem uma matriz energética muito variada (Ministério de Minas e Energia, 2015). A

energia solar pode ser considerada uma das possíveis fontes de energia para aumentar a cota de geração renovável. O investimento no setor tem aumentado vastamente nos últimos anos e o país tem condições climatológicas para explorar esse tipo de fonte de energia, mostrando preços competitivos (Tiba, 2000).

As indústrias de processamento de cana-de-açúcar são particularmente importantes para este estudo (González, 2011), dada a grande quantia de resíduos do processo que podem ser usados como biomassa. Em suma, existem três importantes fontes renováveis vindas da cana-de-açúcar: o bagaço (Alves, 2006) - resíduo da cana frequentemente utilizado na indústria -, o palhico (palha) - composto de folhas verdes e secas e do ponteiro da cana, ainda não explorado em plenitude dado a pré-queima dos canaviais - e a vinhaça (Rego, 2006) - resíduo da destilação da *garapa* que pode ser transformada em biogás com a tecnologia de digestão anaeróbia (Pinto, 1999).

Assim, dada a importância de plantas de açúcar e etanol no cenário brasileiro e sabendo que essas estão majoritariamente instaladas em locais de alta insolação, com poucas chuvas durante o

dia no período da colheita, elas se tornam potenciais candidatas para a implantação distribuída de geração híbrida de energia (Costa Filho, 2013), considerando biomassa, biogás e energias solar e eólica. Geração distribuída refere-se, aqui, a um conjunto de plantas de energia, perto do usuário final, que podem ser integradas à rede ou atuarem de forma aut noma, também conhecidas como *microrredes* (Lasseter, 2004).

Este trabalho propõe um novo sistema de geração híbrida de energia, com a reutilização dos resíduos da cana-de-açúcar acoplada com o uso de fontes renováveis externas à usina de processamento da cana, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. A microrrede proposta é baseada em uma unidade real de uma indústria de processamento de cana-de-açúcar, com a adição de subsistemas baseados em geração renovável.

A seção 2 descreve o sistema de geração híbrida proposto, a seção 3 detalha sua modelagem e a metodologia usada para tal, enquanto a seção 4 mostra os resultados de simulação do sistema proposto. A seção 5 apresenta as conclusões.

2 O Sistema de Geração Híbrida de Energia

Este trabalho propõe um sistema genérico de geração híbrida de energia, baseado em uma planta de processamento de cana-de-açúcar, produtora de etanol e açúcar. A planta de energia modelada neste trabalho é baseada em uma planta industrial brasileira, cuja estrutura é mostrada na figura 1. O sistema proposto, por sua vez, é composto dos seguintes subsistemas: Duas caldeiras, com diferentes eficiências; duas turbinas, com diferentes eficiências; uma estrutura de geração de calor e potência elétrica combinada (chamado *CHP*, *combined heat and power system*); uma estrutura de refrigeração de  gua (*Chiller*); um tanque de água quente; painéis fotovoltaicos; aquecedores de água solares; uma turbina eólica; duas válvulas redutoras de pressão; um trocador de calor; estoques (armazenamento) de bagaço, palh o e biogás comprimido; um banco de baterias.

O sistema proposto, por ser uma plausível adaptação a uma planta real, é interessante dos pontos de vista econ mico e da sustentabilidade, já que propõe o uso de fontes renováveis e a reciclagem dos resíduos da cana. Isso implica diretamente no aumento da capacidade total de geração de energia e, também, na eficiência e sustentabilidade do sistema, que, neste trabalho, não usa nenhum combustível f ssil ou fonte exterior   indústria de processamento de cana-de-açúcar. A figura 2 mostra o perfil do sistema proposto.

As duas caldeiras, aqui denominadas "mais eficiente" e "menos eficiente", produzem, respectivamente, vapor a pressão mais elevada ($67 \frac{kg_F}{cm^2}$) e a pressão média ($21 \frac{kg_F}{cm^2}$). Ambas caldeiras são mo-

vidas a combustão de biomassa misturada, composta por palh o e bagaço. A caldeira menos eficiente produz um fluxo de vapor menos volumoso, usado para atender às demandas de pressão média do processo (para produção de açúcar e etanol). O fluxo de vapor mais volumoso é usado para acionar as turbinas do sistema. As turbinas, tal como as caldeiras, são denominadas "mais eficiente" e "menos eficiente". A turbina mais eficiente tem um fluxo residual de vapor ($1.5 \frac{kg_F}{cm^2}$) que é usado para atender às demandas de vapor de baixa pressão do processo, enquanto a turbina menos eficiente tem um fluxo de vapor residual, de média pressão, usado para atender às demandas de pressão média do processo. Ambas as turbinas produzem energia elétrica que, junto ao *CHP* (*Combined Heat and Power*) e a geração de energia a partir das fontes renováveis, atendem às demandas elétricas. O *CHP*   uma unidade de geração combinada de energia elétrica e calor. Ele possui uma turbina movida a biogás, proveniente da vinhaça, para geração de energia elétrica através de combustão. O calor liberado é recuperado no aquecimento de água, fazendo o *CHP* um sistema altamente eficiente. O uso de armazenadores de energia permite acumular energia quando a produção renovável   alta e futuramente us -la quando não há produção renovável suficiente.

O problema exposto   sujeito a diversas restrições. Primeiramente, as eficiências das caldeiras variam de acordo com a mistura de biomassa que as aciona. O palh o é um resíduo úmido da cana-de-açúcar, logo uma mistura com muito palh o causa problemas de ignição às caldeiras. É conhecido que a melhor mistura possível de bagaço e palha para acionar caldeiras é uma mistura com 50% de cada biomassa (Viana, 2014), (Tolentino, 2007) e (Júnior, 2009). Os ganhos est ticos das caldeiras usadas variam de acordo com a mistura de biomassa usada; misturas com mais palh o tem poder calorífico maior, mas são mais  midas. Esse é um problema de controle ótimo, uma vez que a quantidade de bagaço disponível em um canal é sempre maior que a quantidade de palh o - em média, na planta estudada, há uma entrada de $93 \frac{t}{h}$ de bagaço e $8,7 \frac{t}{h}$ de palh o. Neste trabalho, foram considerados os fatores de mistura de biomassa α_A e α_B , para as caldeiras mais e menos eficientes, como mostrado na figura 3

A planta proposta deve satisfazer quatro demandas: demanda de potência elétrica, dado o processamento da cana-de-açúcar para gerar etanol e açúcar e a um contrato com a distribuidora local de energia; demandas de fluxos de vapor   média e baixa pressão, consequência do processo; demanda de refrigeração ( gua fria), definida também pelo processo. É importante mencionar que satisfazer cada uma das demandas individualmente não é adequado, por elas serem intrinsecamente interconectadas. Como um exemplo: au-

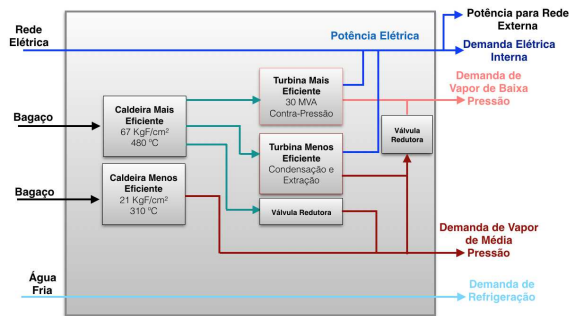


Figura 1: Indústria Base

mentar a produção de potência gerada pelas turbinas conseqüentemente aumenta a produção de vapor.

A demanda elétrica que deve ser cumprida pela microrrede consiste em dois fatores: a demanda de produção, para manter o processamento da cana-de-açúcar, em média $8000kW$, e a quantidade de energia que deve ser vendida para a distribuidora local ($11.52GWh$ mensais, definidos em contrato). Essa produção pode ser contínua, mantendo uma potência média, ou variada, com diferentes valores de potência a cada hora do dia.

As demandas de fluxo de vapor do sistema correspondem às demandas do processamento da cana-de-açúcar. Essas são usadas para acionar bombas d'água, bombas de *spray*, exaustores, picadores, retalhadores e outros equipamentos. A demanda de refrigeração da microrrede é usada para resfriar geradores, tanques de óleo do processo de destilação e outros sistemas presentes na planta.

3 Modelagem do Sistema

Nesta seção, é exposta a modelagem da planta de geração de energia proposta com base na metodologia dos *Energy Hubs*, cuja formulação geral permite flexibilidade em termos de precisão e detalhe de modelagem, tal como qualquer tipo de tecnologia de transmissão, conversão e armazenamento de energia (Geidl, 2007).

3.1 Variáveis Manipuladas

As variáveis manipuladas do sistema são: o *set-point* da caldeira menos eficiente, $SP_C^B(\frac{t}{h})$; o *set-point* da turbina menos eficiente, $SP_{TU}^B(kW)$; o *set-point* da turbina mais eficiente, $SP_{TU}^A(kW)$; a potência de carga ou descarga do banco de baterias, $Pot_{Bat}(kW)$; o *set-point* do *CHP*, $SP_{CHP}(kW)$; o *set-point* do *Chiller* de água, $SP_{ch}(\frac{m^3}{h})$; o *set-point* do trocador de calor, $SP_{TC}(\frac{m^3}{h})$; o *set-point* da válvula redutora alta-média de pressão, $Q_V^{Out}(\frac{t}{h})$; o *set-point* da válvula redutora média-baixa de pressão, $Q_V^{MB}(\frac{t}{h})$; a vazão de escape de água quente do tanque, $Q_{Esc}^T(\frac{m^3}{h})$; a vazão de escape de vapor de média

pressão, $Q_{Esc}^M(\frac{t}{h})$; a vazão de escape de vapor de baixa pressão, $Q_{Esc}^B(\frac{t}{h})$ e a potência elétrica vendida para a rede elétrica externa, pela microrrede, $Pot_{Rede}(kW)$. Os *set-points*, variáveis manipuladas, são repassados para controladores de nível inferior. O controle interno de cada subsistema não é tratado neste artigo. O vetor com as variáveis manipuladas é:

$$u = \begin{bmatrix} SP_{TU}^A & SP_{TU}^B & Pot_{Rede} & SP_C^B & \dots \\ Q_V^{Out} & Q_{Esc}^M & Q_{Esc}^B & SP_{CHP} & \dots \\ SP_{Ch} & SP_{TC} & Pot_{Bat} & Q_V^{MB} & Q_{Esc}^T \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

3.2 Vetor de Perturbações

As perturbações do sistema são definidas como:

$$z = [Vnt_{in} \quad Irrd_{in} \quad Baq_{in} \quad Pal_{in} \quad Bq_{in}]^T \quad (2)$$

sendo Vnt_{in} a velocidade do vento na área da planta (medido em $\frac{km}{h}$), usado pelas turbinas eólicas, $Irrd_{in}$ a quantia de irradiação solar na área da planta (medida em $\frac{W}{m^2}$) usada pelas placas fotovoltaicas e pelos painéis aquecedores de água, Bag_{in} , Pal_{in} e $Bgin$ representam os fluxos (em t/h) de entrada nos respectivos acumuladores de bagaço, palhico e biogás comprimido.

3.3 Saídas da Planta

O vetor de saídas do sistemas é definido como:

$$y = [Pot_{Proc} \quad Q_V^M \quad Q_V^L \quad Q_{CW} \quad Pot_{Venda}]^T \quad (3)$$

sendo Pot_{Proc} a potência elétrica disponível ao processo interno da microrrede, Q_V^M a vazão de vapor de média pressão, Q_V^L a vazão de vapor de baixa pressão, Q_{CW} o fluxo de água fria (refrigeração) produzido pela microrrede e Pot_{Venda} a potência elétrica disponível pela planta para a rede externa.

3.4 Fluxos nos Acumuladores

O vetor de estados do sistema é definido como:

$$x = [X_{Bat} \quad X_{Baq} \quad X_{Pal} \quad X_{Bq} \quad X_T]^T \quad (4)$$

3.5 Modelagem dos Armazenadores

Pelos princípios físicos de conservação da massa, pode-se deduzir, logicamente, para cada acumulador, as respectivas equações:

$$\frac{dX_{Bat}}{dt} = \eta_{bat} Pot_{Bat} \quad (5)$$

$$\frac{dX_{Bag}}{dt} = Bag_{in} - Bag_{out} \quad (6)$$

$$Bag_{out} = \alpha_A Q_E^A + \alpha_B Q_E^B \quad (7)$$

$$\frac{dX_{Pal}}{dt} = Pal_{in} - Pal_{out} \quad (8)$$

$$Pal_{out} = (1 - \alpha_A)Q_E^A + (1 - \alpha_B)Q_E^B \quad (9)$$

$$\frac{dX_{Bg}}{dt} = Bg_{in} - Bg_{out} \quad (10)$$

$$\frac{dX_T}{dt} = T_{in} - T_{out} \quad (11)$$

$$T_{in} = Q_S + Q_{CHP} + Q_{TC} \quad (12)$$

$$T_{out} = Q_{Esc}^T + Q_{Ch} \quad (13)$$

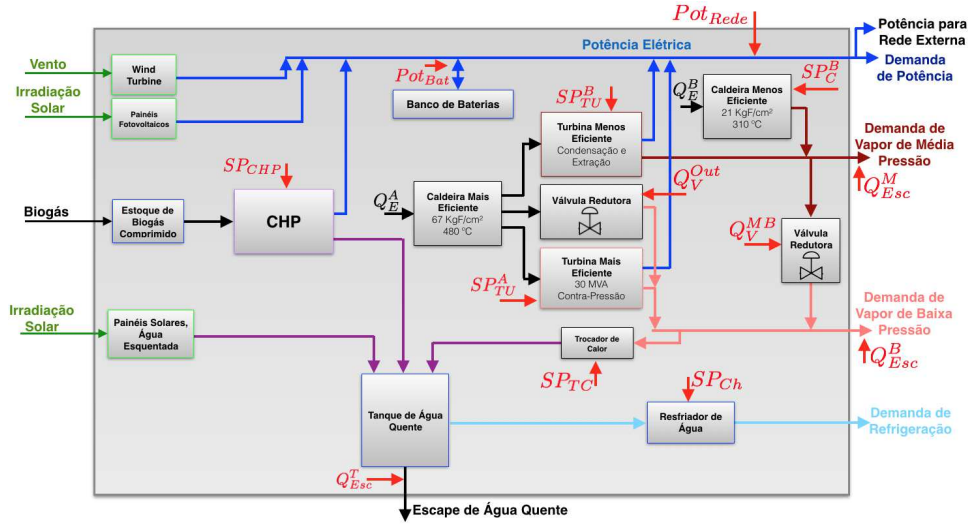


Figura 2: Planta Proposta

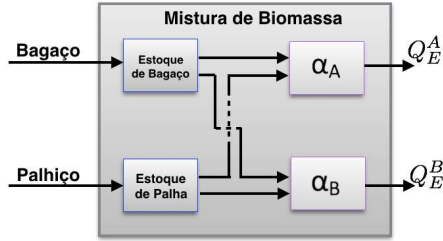


Figura 3: Mistura de Biomassa

A notação X_μ representa a porcentagem normalizada do acumulador μ , sendo este o banco de baterias (X_{Bat}), o estoque de bagaço (X_{Bag}), o estoque de palhico (X_{Pal}), o estoque de biogás comprimido (X_{Bg}) ou o tanque de água quente (X_T). A notação λ_{in} e λ_{out} representam fluxos de entrada e de saída, respectivamente, para cada acumulador. η_{bat} representa a eficiência do banco de baterias, mencionada na equação (??), diferente na carga e na descarga. Bag_{out} e Pal_{out} , como mostram as equações (7) e (9), são consequência dos fluxos de mistura de biomassa, Q_E^A e Q_E^B . Isso fica claro na figura 3. Bg_{out} é consequência do ponto de operação do CHP, aqui decidido pela variável SP_{CHP} . T_{in} é consequência do ponto de operação dos painéis aquecedores (Q_S), da água aquecida pelo CHP (Q_{CHP}) e da água quente vinda do trocador de calor (Q_{TC}), como mostra a equação (12). A equação (13) mostra, por sua vez, que T_{out} é consequência da água quente destinada ao resfriador ($Chiller$, Q_{Ch} , consequência do set-point decidido por SP_{Ch}) e da vazão de escape água quente, decidida por Q_{Esc}^T .

3.6 Representação final no Espaço de Estados

A representação final do sistema proposto, no espaço de estados relaciona o vetor de estado x , (4), com as variáveis manipuladas u , (1), e o vetor de

perturbação z , (2), de acordo com:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Cz(k) \quad (14)$$

$$y(k) = Dx(k) + Eu(k) + Fz(k) \quad (15)$$

As matrizes das equações à tempo discreto (14) e (15) são colocadas como:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 & \beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_3 & \beta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_5 & \beta_6 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_7 & \beta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_9 & \beta_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{12} \\ (\Delta T \times \eta_{bat}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{13} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{4,5} \\ 0 & e_{5,2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$E = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & \epsilon_2 & 0 & 0 \\ \epsilon_3 & \epsilon_4 & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_5 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_6 \\ 0 & \epsilon_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{16} & 0 & 0 \\ \epsilon_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \epsilon_{10} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ \epsilon_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{13} & \epsilon_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

$$F = \begin{bmatrix} \psi_{1,1} & \psi_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A é uma matriz identidade, que relaciona o próximo estado ($k+1$) com o atual (k). B expressa a relação entre o próximo estado e as variáveis manipuladas (u). Através das variáveis auxiliares β e da entrada (11, 1) de B^T , são garantidas a conservação da energia e da massa, no sistema. B garante o que é exposto nas equações (7), (9), (10), (12) e (13). C expressa a relação entre o próximo estado as perturbações externas (z). Através das variáveis $\varrho_{i,j}$ são garantidos os efeitos das perturbações, como colocado nas equações (6), (8), (10) e (12).

D é uma matriz nula, dado que, no sistema estudado, as saídas não dependem dos estados. E demonstra a relação entre as saídas (y) e as variáveis manipuladas (u). As variáveis auxiliares ϵ garantem que as saídas, respectivamente, correspondam   potência elétrica disponível para o processo, ao fluxo de vapor de média pressão, ao fluxo de vapor de baixa pressão,   vazão de água fria e   potência elétrica disponível para rede externa ao sistema (venda). F mostra a relação entre as saídas e as perturbações externas. As variáveis auxiliares $\psi_{i,j}$ garantem a influência da irradiação solar e da velocidade do vento na planta na produção renovável do sistema.

As variáveis auxiliares mencionadas estão colocadas na tabela 1, onde K_A e K_B representam os respectivos ganhos das caldeiras, que variam de acordo com α_A e α_B .

Tabela 1:  ndice de Valores

β_1	$-\frac{\alpha_A}{32000 \times K_A} \frac{1}{kW}$	β_3	$-\frac{\alpha_A}{17000 \times K_A} \frac{1}{kW}$
β_5	$-\frac{\alpha_B}{200 \times K_B} \frac{h}{t}$	β_7	$-\frac{\alpha_A}{200 \times K_A} \frac{h}{t}$
β_2	$-\frac{(1-\alpha_A)}{3200 \times K_A} \frac{1}{kW}$	β_4	$-\frac{(1-\alpha_A)}{1700 \times K_A} \frac{1}{kW}$
β_6	$-\frac{(1-\alpha_B)}{20 \times K_B} \frac{h}{t}$	β_8	$-\frac{\alpha_A}{20 \times K_A} \frac{h}{t}$
β_9	$-0.011 \frac{1}{kW}$	β_{10}	$0.15 \times 10^{-2} \frac{1}{kW}$
β_{11}	$-0.42 \frac{h}{m^3}$	β_{12}	$\frac{1}{3} \frac{h}{m^3}$
β_{13}	$-1 \frac{h}{m^3}$	—	—
$\varrho_{2,3}$	$\frac{1}{200} \frac{h}{t}$	$\varrho_{3,4}$	$\frac{1}{20} \frac{h}{t}$
$\varrho_{4,5}$	$0.416 \times 10^{-2} \frac{h}{t}$	$\varrho_{5,2}$	$0.466 \times 10^{-2} \frac{m^2}{W}$
ϵ_1	1	ϵ_3	1
ϵ_5	-1	ϵ_9	1
ϵ_{12}	-1	ϵ_4	$0.0117 \frac{t}{kW \cdot h}$
ϵ_7	1	ϵ_8	1
ϵ_{13}	-1	ϵ_2	$0.625 \times 10^{-2} \frac{t}{kW \cdot h}$
ϵ_{11}	$-0.025 \frac{t}{m^3}$	ϵ_{14}	1
ϵ_{10}	1	ϵ_6	1
ϵ_{15}	-1	ϵ_{16}	-1
$\psi_{1,1}$	$100 \frac{W \cdot h}{m}$	$\psi_{1,2}$	$0.8 km^2$

4 Simulação

Para fins de demonstração de funcionamento da planta híbrida de geração de energia aqui estudada, são apresentadas, nesta seção, as simulações do sistema, controlado por uma estrutura de controle avançado apresentada em (Morato, 2016). A figura 4 mostra um cenário de 24 horas de simulação do sistema proposto e o uso de cada subsistema: comportamento do banco de baterias, potência produzida pelo *CHP* e pelas turbinas e pelas fontes renováveis. Já a figura 5 mostra a simulação do mesmo cenário na planta industrial base, sem o uso dos subsistemas adicionais (*CHP*, banco de baterias, fontes renováveis) e sem a reutilização dos resíduos da cana-de-a  ar, movida   gás natural. Comparando as figuras, observa-se o ganho em termos de energia limpa, sustentável produzida em 123MWh (produção renovável e do *CHP*) no sistema proposto.

5 Conclusões

Este artigo propõe uma estrutura de geração híbrida de energia, que usa como base uma indústria de processamento de cana-de-a  ar.   possível concluir que essa nova estrutura é uma proposta com ganhos em termos de eficiência, sustentabilidade e geração de energia. A modelo proposto neste trabalho   de grande importância para a aplicação em controladores preditivos para gerenciamento de energia. Como perspectiva para trabalhos futuros um ponto interessante é a aplicação de técnicas de controle avançado para a planta de geração de energia, quando sujeita à restrições de operação e demandas de processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao *CNPq* pelo financiamento dos projetos *CNPq401126/2014-5* e *CNPq303702/2011-7* e ao *Ministerio de Economía y Competitividad de Espa a* pelo financiamento do projeto *DPI2013-46912-C2-1-R*.

Referências

- Alves, J. M. (2006). Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana de a  ar em goiás, *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.
- Costa Filho, M. V. A. d. (2013). Modelagem, controle e otimização de processos da indústria do etanol.
- Geidl, M. ; Koeppel, G. F.-P. P. . K. B. A. G. K. (2007). Energy hubs for the future, *IEEE Power and Energy Magazine* 5(1): 24.

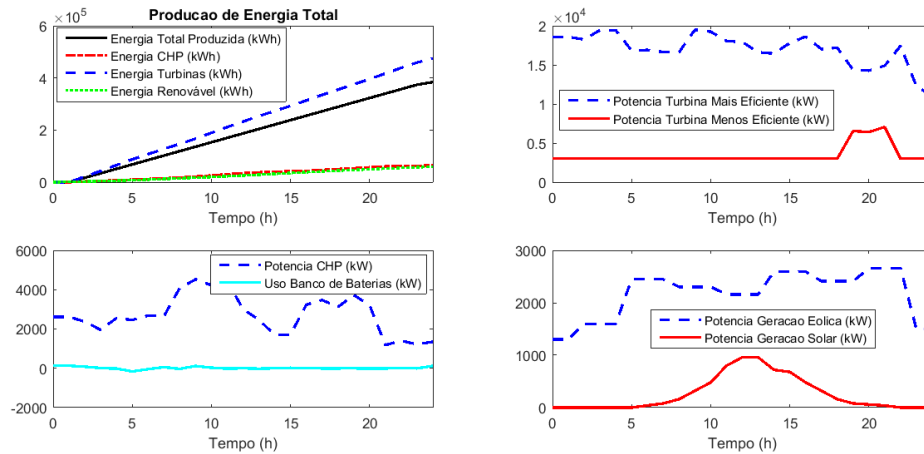


Figura 4: Geração no Sistema Proposto

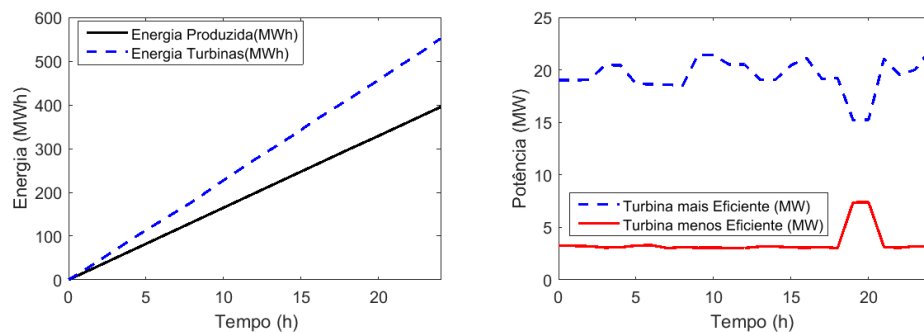


Figura 5: Geração no Sistema Base

González, J. R. P. (2011). *Libro Blanco de la Automatización en la Industria de la Caña de Azúcar*, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Jiayi, H. ; Chuanwen, J. R.-X. (2008). A review on distributed energy resources and microgrid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(9): 2472 – 2483.

Johansson, T. B. (1993). *Renewable energy: sources for fuels and electricity*, Island press.

Júnior, Romão ; Agudo, R. (2009). Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira.

Lasseter, R. H. ; Paigi, P. (2004). Microgrid: a conceptual solution, *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, Vol. 6, IEEE, pp. 4285–4290.

Ministério de Minas e Energia, G. F. (2015). Resenha energética brasileira: Exercício de 2014, pp. 6 – 19.

Morato, M. M.; Mendes, P. R. C. N.-R. J. E. B. C. (2016). Optimal operation of hybrid power systems including renewable sources in the

sugar cane industry, *Technical report*, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas.

Pinto, C. P. (1999). Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável.

Rego, E. E. ; Hernandez, F. d. M. (2006). Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção, *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.

Shafiee, S. ; Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy policy* **37**(1): 181–189.

Tiba, C. (2000). Atlas solarimérico do brasil.

Tolentino, G. ; Florentino, H. d. O. . S.-M. M. P. (2007). Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com menor custo, *Bragantia* pp. 729–735.

Viana, L. F. (2014). Potencial energético do bagaço e palhço de cana-de-açúcar, cv. sp80-1842, em área de alambique artesanal.