

## Desenvolvimento de um código numérico aplicados em ciclos termodinâmicos

## Development of a numerical code applied in thermodynamic cycles

### RESUMO

**Guilherme Leonhano Alves**  
[guileonhano@gmail.com](mailto:guileonhano@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

**Fábio Kenji Sugimoto**  
[fsugimoto@utfpr.edu.br](mailto:fsugimoto@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa em linguagem Python com o objetivo de automatizar os cálculos termodinâmicos de uma planta de usina sucroalcooleira com cogeração, visando realizar uma análise energética e exergetica, além da otimização através da variação dos parâmetros da instalação buscando uma maior eficiência. Nos cálculos térmicos foram utilizadas como base a primeira e segunda lei da termodinâmica para obter os resultados da instalação. Para a otimização foi implementado o algoritmo genético onde sua função avaliação foi o programa desenvolvido para os cálculos termodinâmicos. Os resultados obtidos foram iguais aos valores adotados como referência, com isso é possível concluir que o programa funcionou de forma esperada para os cálculos térmicos, para a otimização os resultados obtidos para os parâmetros variados foram iguais aos valores reais da planta, mostrando assim que para essas condições a planta já estava otimizada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cogeração. Otimização. Bagaço de cana. Indústria açucareira.

### ABSTRACT

This paper presents the development of a software in Python language with the objective of automating the thermodynamic calculations of a sugar and alcohol plant with cogeneration, aiming to perform an energetic and exergetic analysis, in addition to optimization through the variation of the installation parameters seeking greater efficiency. In the thermal calculations, the first and second laws of thermodynamics were used as a basis to obtain the results of the installation. For optimization, the genetic algorithm was implemented where its evaluation function was the software developed for thermodynamic calculations. The results obtained were equal to the values adopted as a reference, so it is possible to conclude that the program worked as expected for thermal calculations, for optimization the results obtained for the varied parameters were equal to the real values of the plant, thus showing that for under these conditions the plant was already optimized.

**KEYWORDS:** Cogeneration. Optimization. Sugarcane bagasse. Sugar industry.

**Recebido:** 4 set. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A cogeração tem sido amplamente utilizada no setor sucroalcooleiro nas últimas décadas, por meio dela é possível aproveitar o bagaço da cana para fornecer o calor e energia elétrica que são utilizados nos processos de produção do açúcar e do álcool, mas nem sempre foi assim. Segundo Ramos et al. (2003) até no início da década de 1980, o mesmo bagaço queimado para gerar calor para o processo de produção ainda era visto como um rejeito indesejado, sendo queimado em caldeiras de baixa eficiência consideradas como verdadeiros incineradores que realizavam o descarte do mesmo.

Prieto e Nebra (2001) mostram que desde o início dos anos 2000, quando houve mudanças no setor elétrico brasileiro, a venda de energia elétrica tem ficado mais atrativa, estimulando assim as indústrias sucroalcooleiras a investirem em melhorias nas suas plantas de cogeração visando também a energia elétrica como um produto. Com isso várias usinas passaram a investir mais em suas plantas de cogeração não só buscando uma ampliação na produção de açúcar e álcool, mas também a venda do excedente de energia elétrica. Jaguaribe et al. (2002, p. 1) mostram que “A Japungu Agroindustrial S. A., [...] exige que se faça a ampliação do seu sistema de cogeração, com vistas não apenas atingir sua autossuficiência energética [...], mas também, tornar possível a mercantilização [...]”.

Com o aumento da demanda de energia, surgiu a necessidade de plantas mais eficientes que as anteriores, sendo o estudo para otimizar os processos e os equipamentos cada vez maior, com a finalidade de aumentar a energia produzida com a mesma quantidade de combustível.

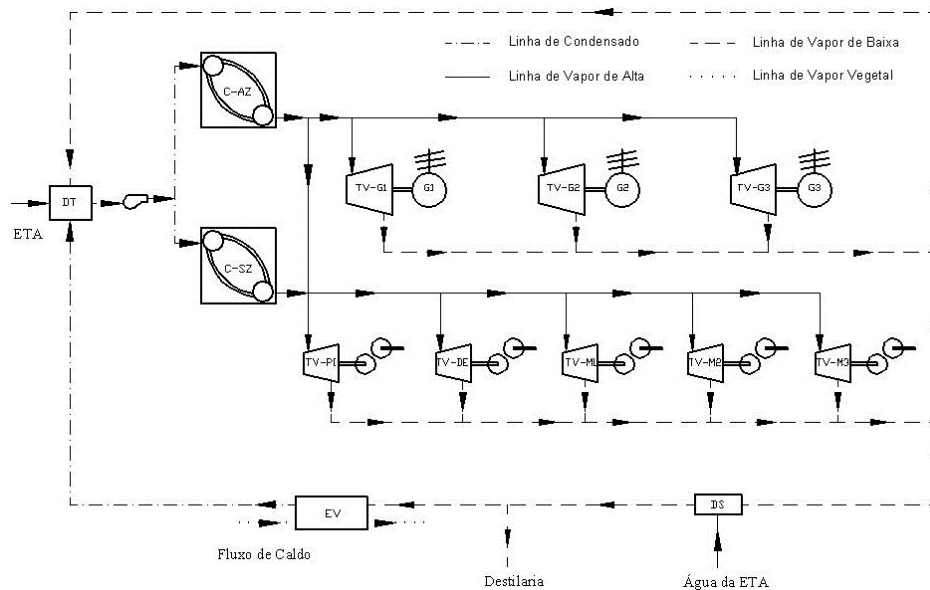
Atualmente a forma mais rápida e prática de calcular a eficiência de uma planta, assim como outros parâmetros, é através de programas computacionais. Zoder et al. (2018) dizem que a maioria dos programas que calculam os parâmetros térmicos dos componentes de uma instalação são programas não livres, pertencentes a grandes empresas, mas é possível desenvolver um programa de código aberto utilizando a programação orientada a objeto através da linguagem Python.

Dentro deste contexto o presente trabalho dedica-se a implementação de um código aberto utilizando a linguagem Python e sua programação orientada a objeto para desenvolver um programa capaz de simular termicamente uma planta de cogeração pertencente a uma usina sucroalcooleira e realizar a otimização na mesma.

## MATERIAL E MÉTODOS

A planta utilizada para o estudo foi a descrita por Ramos et al. (2003) e pertencente a Destilaria Pioneiros S.A, onde primeiramente foi analisado uma planta que estava em operação na safra de 2003/2004, representada na Figura 1, e uma configuração futura que seria implantada para a próxima safra. No presente trabalho os valores serão comparados apenas com a planta da configuração inicial devido à maior riqueza nas informações descritas.

Figura 1 – Fluxograma da instalação considerada



Fonte: Ramos et al. (2003)

Os termos C-AZ e C-SZ correspondem as duas caldeiras da instalação, TV-G1, TV-G2 e TV-G3 aos três turbogeradores, TV-PI e TV-DE as turbinas que acionam o picador e desfibrador respectivamente, TV-M1, TV-M2 e TV-M3 as três turbinas responsáveis pelas três moendas, DT ao desaerador térmico, DS ao dessuperaquecedor, EV ao evaporador do caldo e ETA é a estação de tratamento de água.

Para determinar o desempenho térmico de qualquer sistema é utilizado a análise pela primeira lei da termodinâmica, com ela é possível obter as eficiências de cada equipamento assim como do ciclo completo. Apesar de ser a mais usual essa análise possui suas limitações, pois não leva em consideração as irreversibilidades do sistema, para isso precisamos realizar também uma análise exérgica pela segunda lei da termodinâmica.

Para realizar uma análise energética e exérgica de qualquer instalação, deve-se primeiro definir para cada equipamento as eficiências de primeira e segunda lei, um balanço de massa, energia e exergia e pôr fim a irreversibilidade do processo

No presente trabalho foram utilizadas as equações termodinâmicas em suas formas simplificadas considerando que o volume de controle está em regime permanente e são desconsideradas as variações de energia cinética e potencial entre a entrada e a saída. Para o cálculo da exergia específica do combustível, o bagaço da cana, foram utilizadas as equações mostradas por Cavalcanti, Carvalho e Silva (2020)

Para melhor avaliação dos processos e comparação entre as plantas serão considerados os mesmos critérios de desempenho globais mostrados por Ramos et al. (2003), estes estão descritos a seguir:

FUE: Fator de utilização de energia, representa a eficiência de primeira lei do sistema.

$$FUE = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{Q}_{util}}{\dot{m}_{bag} \cdot PCI_{bag}} \quad (1)$$

IPE: Índice de poupança de energia, representa a economia de combustível obtida pela cogeração em relação a plantas convencionais que produzem separadamente vapor e energia elétrica.

$$IPE = 1 - \frac{\dot{m}_{bag} \cdot PCI_{bag}}{\dot{W}_{total} / \eta_{term\_ref} + \dot{Q}_{util} / \eta_{cald\_ref}} \quad (2)$$

IGP: Índice de geração de potência, representa a eficiência de parte de produção de potência de instalação.

$$IGP = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{m}_{bag} \cdot PCI_{bag} - \dot{Q}_{util} / \eta_{cald}} \quad (3)$$

RPC: Razão potência-calor, representa a relação entre a potência e o calor.

$$RPC = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{util}} \quad (4)$$

Onde  $\dot{W}_{total}$  é a potência total da instalação,  $\dot{Q}_{util}$  é o calor útil fornecido pela instalação,  $\eta_{term\_ref}$  é a eficiência térmica de uma planta de potência de referência, considerado como 40%,  $\eta_{cald\_ref}$  é a eficiência térmica de uma caldeira de vapor saturado, considerado como 77% e  $\eta_{cald}$  é a eficiência térmica das caldeiras da unidade.

Assim, foi desenvolvido um código com o objetivo de automatizar todos os cálculos para realizar uma análise energética exérgica de uma planta de cogeração.

O funcionamento do programa ocorre da seguinte forma: cada linha da instalação, tubulação que liga um equipamento a outro como representado na Figura 1, é tratada como um estado termodinâmico. Quando informada qual é a temperatura e pressão, o programa utiliza a biblioteca CoolProp para obter a entropia e a entalpia e com isso calcular a exergia do estado. Com os estados definidos são criados os componentes, informando qual é o estado de entrada e saída, assim de acordo com cada equipamento o programa calcula o que é necessário como: calor útil, potência, eficiência de primeira e segunda lei e a taxa de irreversibilidade. Após todos os componentes definidos o programa agrupa todos os dados e determina os critérios de desempenho de instalação.

Para a otimização implementou-se um algoritmo genético, nele as variáveis do problema são tratadas como se fossem cromossomos de indivíduos de uma população. Após serem criadas restrições para as variáveis o algoritmo gera a população inicial, com um número definido de indivíduos, de forma aleatória. Após isso, é utilizada uma função de avaliação para ordenar os indivíduos da população do melhor para o pior, nesse caso essa função é o próprio programa criado anteriormente, sendo utilizado em cada indivíduo com os dados presentes no cromossomo para obter as soluções da instalação. Assim é possível organizar a população de acordo com qualquer parâmetro de saída do programa, como por exemplo FUE, IPE, IGP, RPC, trabalho total produzido o calor útil da instalação.

Depois de criada e organizada a primeira população é criada uma população a partir da população inicial com base na biologia evolutiva utilizando os conceitos de seleção natural, cruzamento entre indivíduos pelo método de recombinação e possibilidade de mutação aleatória do cromossomo. Essa nova população é a

segunda geração de indivíduos e é ordenada igualmente a primeira, esse processo repete-se até o número de gerações se igualar ao número pré-definido no início do algoritmo. A melhor solução será o melhor indivíduo com melhor avaliação dentre todas as gerações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de operação foram inseridos seguido dos componentes da instalação, definindo qual era o parâmetro de entrada e saída de cada equipamento. Com isso o programa retornou os valores pertinentes de cada equipamento individualmente e os critérios de desempenho total da instalação.

Os valores obtidos pelo programa serão apresentados e comparados aos valores obtidos por Ramos et al. (2003) com a finalidade de verificar se o programa está funcionando corretamente.

Tabela 1 – Comparação dos valores de eficiência

Equipamento	Valores de Referência*		Valores Calculados	
	$\eta_I$ (%)	$\eta_{II}$ (%)	$\eta_I$ (%)	$\eta_{II}$ (%)
Caldeira	65,9	19,1	65,9	19,1
Turbogeradores	39,5	47,3	39,7	47,5
Turbomoendas	36,9	44,2	36,8	44,6

\*Fonte: Ramos et al. (2003)

Tabela 2 – Comparação dos resultados da instalação

Resultados da instalação	Valores de Referência*	Valores Calculados
Potência mecânica gerada (MW)	2,9	2,92
Potência elétrica gerada (MW)	2,6	2,57
Potência térmica útil (MW)	75,0	76,07
Fator de Utilização de Energia (FUE)	0,63	0,632
Índice de Poupança de Energia (IPE)	-0,15	-0,147
Índice de Geração de Potência (IGP)	0,40	0,400
Razão Potência-Calor (RPC)	0,07	0,071

\*Fonte: Ramos et al. (2003)

Conforme mostrado nas Tabelas 1 e 2 é possível notar que os valores obtidos pelo programa ficaram muito próximos aos valores de referência, sendo possível afirmar que os valores obtidos pelo programa são válidos.

Com o programa validado iniciou-se o processo de otimização. Para a análise foram fixadas as eficiências de cada equipamento, as pressões nas linhas de condensado e vapor de baixa e a temperatura na saída do dessuperaquecedor nos valores obtidos pelos cálculos iniciais. Após isso foram definidos os pontos variáveis, nesse caso foi decidido variar as vazões mássicas de vapor em cada caldeira em até - 30% e a pressão de vapor de alta em - 20%, foram adotados somente os valores negativos assumindo que a caldeira estava em sua máxima

capacidade no início, também foi definida a variação da vazão mássica de vapor que retorna ao desaerador em  $\pm 100\%$ .

Tabela 3 – Comparação dos valores otimizados.

Variáveis	Valores de Referência*	Valores Calculados
Vazão da caldeira C-AZ (Ton/h)	70	69
Vazão da Caldeira C-SZ (Ton/h)	50	49
Vapor que retorna ao DT (Ton/h)	2,00	1,81
Pressão do vapor de alta (Mpa)	3,00	2,99

\*Fonte: Ramos et al. (2003)

Considerando um pequeno erro de aproximação do algoritmo genético, os resultados obtidos pela otimização foram iguais aos valores reais da instalação para todos os parâmetros variados, mostrando assim que a planta analisada no estudo já estava otimizada para essa operação.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foi possível validar o programa desenvolvido para simulação e otimização de uma planta de cogeração de uma usina sucroalcooleira com base nos valores do trabalho adotado como referência.

Para a simulação o programa mostrou-se muito preciso, com os valores de entrada da instalação ele retornou valores praticamente idênticos aos adotados de referência como é possível observar nas Tabelas 1 e 2, validando o mesmo com satisfação.

Para a otimização, mesmo não tendo valores teóricos de referência, chegou-se a um resultado satisfatório como é possível ver na Tabela 3. O fato de o código ter obtido uma solução igual aos valores iniciais da planta mostra que ela estava operando de forma otimizada.

## REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; SILVA, D. R. S. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 222, n. 1, 23 jul. 2020.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307767>. Acesso em: 3 set. 2020.

JAGUARIBE, E. F, et al. Estudo termodinâmico e análise de custos da ampliação de um sistema de cogeração de energia em uma destilaria de cana de açúcar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, IX, 2002, Caxambu – MG. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2002. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2002/Paper-title/24/CIT02-0240.pdf>. Acesso em: 3 set. 2020.

PRIETO, M. G. S.; NEBRA, S. A. Análise do custo exergético do sistema de cogeração de uma usina açucareira. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, XVI, 2001, Uberlândia - MG. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2001.

RAMOS, R. A. V. et al. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. *In*: LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION TRANSMISSION, 5, 2003, São Pedro – SP, **Anais...** Disponível em:  
<http://seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/TEIRCS%20B-018.pdf>. Acesso em: 3 set. 2020.

ZODER, M. et al. Simulation and Exergy Analysis of Energy Conversion Processes Using a Free and Open-Source Framework—Python-Based Object-Oriented Programming for Gas- and Steam Turbine Cycles. **Energies**, v. 11, n. 10, p. 2609, 30 set. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2609>  
Acesso em: 3 set. 2020.