

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia Mecânica

IRINEU ROMERA FRANCO JUNIOR

CICLO DE RECUPERAÇÃO COM COGERAÇÃO DE ENERGIA
(COM ROTEIRO DE IMPLEMENTAÇÃO NO EES)

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Graduado em Engenharia Mecânica.

São Paulo

1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia Mecânica

IRINEU ROMERA FRANCO JUNIOR

CICLO DE RECUPERAÇÃO COM COGERAÇÃO DE ENERGIA
(COM ROTEIRO DE IMPLEMENTAÇÃO NO EES)

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:

Energia e Fluidos

Orientador:

Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

São Paulo

1998

Aos professores da Escola Politécnica que,
acreditando no meu esforço e capacidade,
fizeram do seu trabalho um motivo para que
eu encontrasse uma carreira.

E aos meus pais, sempre...

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e Orientador Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta pela confiança, dedicação, esforço e capacidade despendidas na realização desse trabalho.

Ao Prof. Alberto Hernandez pela ajuda e compreensão.

Aos Professores Prof. Dr. Euríale de Jesus Zerbini e Prof. Maurício Trielli pela estima e consideração.

À Camila.

Índice

1. Objetivo.....	1
2. Introdução.....	2
2.1 Definição do Ciclo.....	3
3. Modelagem dos Fenômenos no Ciclo.....	5
3.1 Os gases residuais.....	5
3.2 O isolamento térmico.....	6
3.3 O superaquecedor.....	7
3.4 A caldeira.....	8
3.5 O economizador.....	9
3.6 O compressor.....	10
3.7 A turbina.....	11
Roteiro para a Implementação de Sistemas no EES.....	13
4. Modelagem.....	15
4.1 Identificação do problema.....	15
4.2 Formulação do problema.....	15
4.2.1 Identificação das variáveis determinantes.....	17
4.2.2 Leis e Correlações.....	17
4.2.3 Equacionamento teórico fechado.....	18
5. A Implementação (roteiro).....	19
5.1 Nomenclatura.....	19
5.2 Ordenação (por uma escolha objetiva).....	19
5.3 Parâmetros gerais fixados (condições de contorno).....	20
5.4 Dependências: equacionamento ordenado por graus de liberdade.....	21
5.5 Obtenção do resultado.....	22
5.6 Análise de variação.....	22
6. A Implementação no EES.....	24
6.1 O superaquecedor.....	24

6.2 A caldeira.....	26
6.3 O economizador.....	28
6.4 A turbina.....	30
6.5 O compressor.....	31
7. Análises e conclusões.....	32
7.1 Sobre a formulação teórica.....	32
7.2 Sobre o roteiro de implementação.....	32
7.3 Sobre os resultados obtidos.....	33
Apêndice.....	35
A1. Legenda.....	35
A2. Adimensionais e outras grandezas.....	36
A3. Determinação do coeficiente de troca de calor global (U_m).....	37
A3.1 Cálculo do coeficiente de troca de calor na corrente interna (h_i).....	37
A3.2 Cálculo do coeficiente de troca de calor na corrente externa (h_o).....	37
A4. Resolução de trocadores de calor.....	38
A4.1 O Método da Efetividade (E-Nut).....	38
Bibliografia.....	40

Anexos:

Listagem do programa

Listagem dos resultados

Exemplo de análise de variação dependente (gráfico)

1. Objetivo

Este trabalho visa a consolidação de uma metodologia para projeto e análise técnica de Ciclos de Recuperação com Cogeração de Energia, tendo em vista a realidade do mercado nacional – um esquema do ciclo pode ser visto na fig. 1.

Para tal fim, o trabalho será desenvolvido no ambiente EES (Engineering Equation Solver), o que facilitará sensivelmente os cálculos relativos à análise dos parâmetros envolvidos nos fenômenos ocorridos durante o ciclo, assim como a apresentação dos mesmos.

Contudo, é importante salientar que esse trabalho constará de três partes fundamentais, sendo elas:

- formulação teórica do problema proposto; no nosso caso, um ciclo de recuperação com cogeração de energia, envolvendo na formulação da caldeira de recuperação, a separação em superaquecedor, economizador e a caldeira propriamente dita.

- Metodologia (roteiro) de implementação da formulação proposta no ambiente EES, sendo na sua abordagem, suficientemente didático, para que aqueles que se propõe a um primeiro contato com o ambiente (EES), possam fazê-lo aproveitando o máximo dos recursos disponíveis. O roteiro incluirá, ainda, como exemplo, a implementação do caso em questão, com as devidas ressalvas simplificadoras que estarão apresentadas durante a formulação teórica do mesmo.

- O “programa” obtido através da implementação da formulação descrita acima, bem como os resultados e análises, advindos dessa formulação.

Dito isto, comecemos...

2. Introdução

O fim do monopólio estatal na geração de energia elétrica abre ao Brasil novas oportunidades de otimização na área de conservação de energia, o que permite a implantação de sistemas de cogeração. Em todo o mundo, a cogeração vem assumindo uma importância crescente, sendo fortemente incentivada por governos e por empresas privadas de distribuição de energia. Entretanto, a economia e as vantagens obtidas com o uso desses sistemas ainda são pouco conhecidas (e aplicadas) no Brasil.

Também, em virtude da crescente preocupação com a racionalização da energia, além das indústrias estarem voltando-se para o aumento da eficiência dos seus processos produtivos, está havendo a preocupação em recuperar as possíveis perdas de energia ao longo desses processos, uma vez que podem ocorrer mudanças na tarifação energética, ficando cada vez mais claro a urgência em um melhor aproveitamento da energia consumida pelas indústrias.

A Recuperação tratada neste trabalho é a tarefa de conseguir aproveitar a energia (térmica) contida nos gases que escapam pelas chaminés de alguma indústria, produtos da queima de combustíveis fósseis, em altas temperaturas.

Durante a Recuperação, ocorrerá a troca de calor entre os gases e os tubos do sistema (superaquecedor, caldeira e economizador), que por sua vez trocarão calor com a água em seu interior, provocando assim sua vaporização e posterior superaquecimento. Depois de superaquecido, o vapor passará por uma turbina que gerará energia elétrica, resultando ainda vapor a baixa pressão que poderá ser utilizado em algum processo de aquecimento, secagem ou manutenção da temperatura de algum outro processo.

Sendo assim, o ciclo que estudamos aqui, por gerar duas formas de energia (térmica e elétrica) a partir de uma, trata-se de um ciclo de Cogeração; e como aproveita a energia contida nos gases residuais de um processo, pode-se denominar Recuperação.

Temos portanto, nesse documento, uma breve análise e discussão sobre Ciclos de Recuperação com Cogeração de Energia.

2.1 Definição do Ciclo

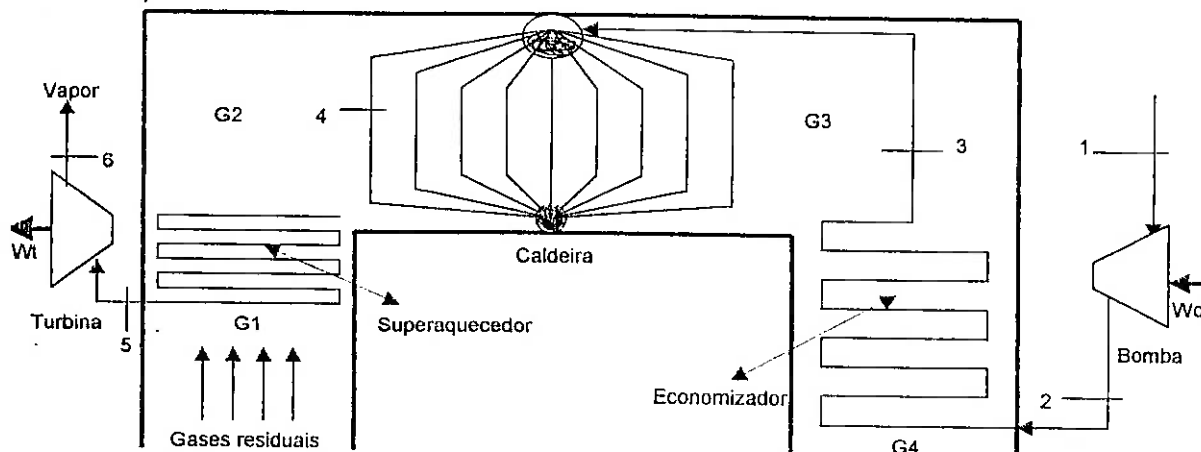


Figura 1: O Ciclo

Como visto na fig.1 o ciclo consiste basicamente nos seguintes fenômenos:

- do lado do vapor
 - bombeamento da água de alimentação (processo 1-2)
 - troca de calor com os gases residuais, com conseqüente vaporização e superaquecimento (processo 2-3-4-5)
 - expansão do vapor através da turbina, gerando trabalho (processo 5-6)
- do lado dos gases residuais
 - troca de calor com os tubos do sistema de recuperação
 - troca de calor com o meio (paredes)

Temos que, a água, depois de ser bombeada (processo 1-2) troca calor no economizador (2-3) até a vaporização (3-4), em seguida passa por um superaquecimento (4-5) e posterior expansão (5-6), gerando trabalho.

Já os gases residuais terão sua energia interna variando em função da perda de calor para o meio e para a água (vapor), com as respectivas perdas de carga durante o escoamento, definindo os estados G1, G2, G3 e G4, que são respectivamente os estados

de entrada, depois do superaquecedor, depois da caldeira e depois do economizador (na saída).

Para melhor entendimento, os estados estão representados no diagrama abaixo.

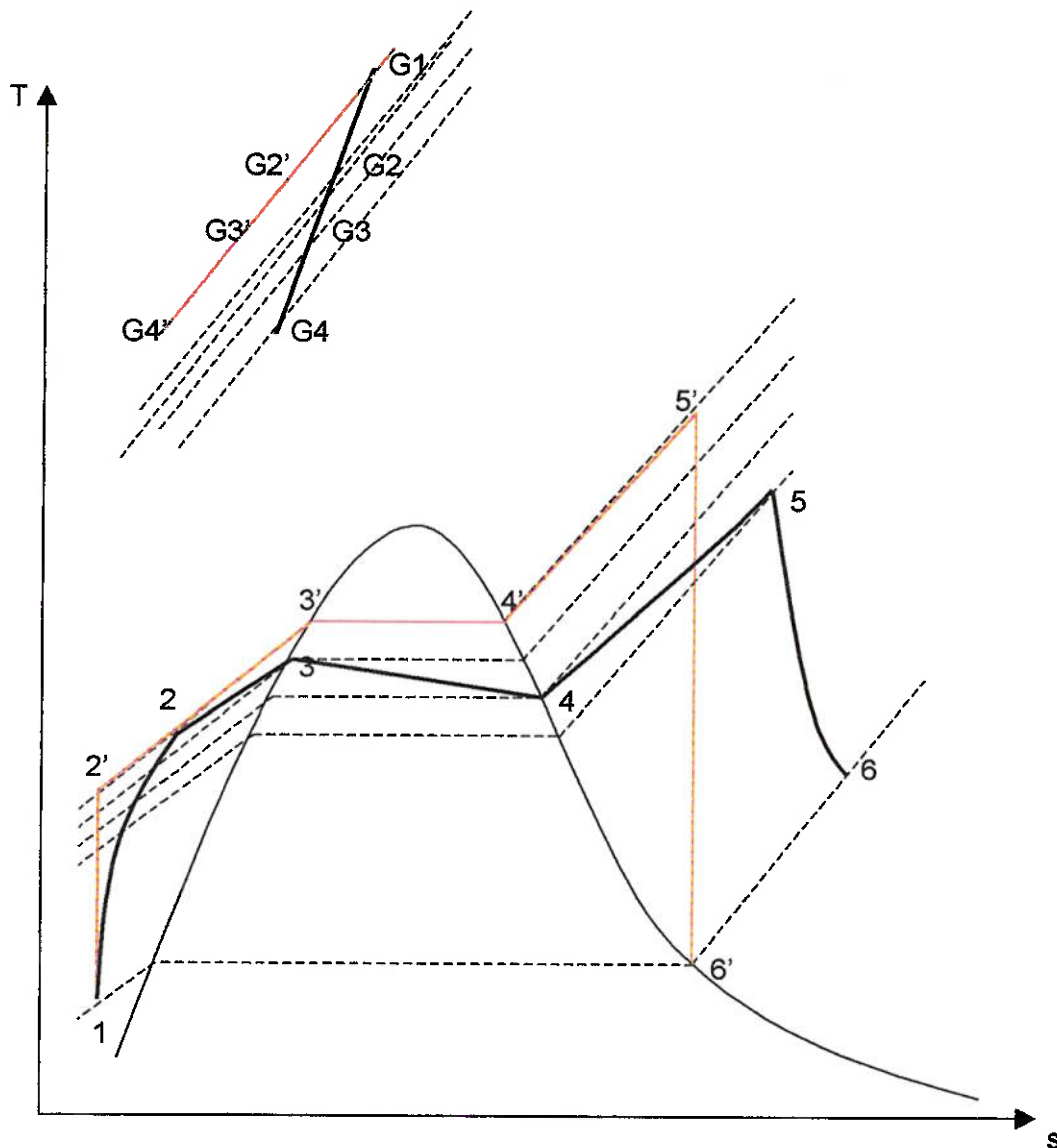


Fig.2 Diagrama para o Ciclo estudado:
processos com perdas e irreversibilidades, 1-2-3-4-5-6 e G1-G2-G3-G4
processos sem perdas e irreversibilidades, 1-2'-3'-4'-5'-6' e G1-G2'-G3'-G4'

3. Modelagem dos fenômenos no Ciclo

3.1 Os gases residuais

Sabemos que, para modelar a transferência de calor entre fluidos, devemos conhecer algumas de suas propriedades (densidade, condutibilidade, calor específico, etc...); como no nosso caso estamos lidando com uma mistura de gases, devemos utilizar um método de cálculo que nos permita determinar o valor das propriedades dessa mistura, conhecidas as propriedades de cada uma das substâncias integrantes desta.

Como mostra Perry¹

$$c_{p_f} = \sum_{i=1}^n r_i c_{p_i}$$

onde : c_{p_f} é o calor específico do fluido (mistura)

c_{p_i} é o calor específico do elemento i da mistura, nas condições de temperatura e pressão da mesma

r_i é a fração molar do elemento i na mistura.

ainda :

$$\mu_f = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n r_j \phi_{ij}} \quad \text{onde : } \phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^2 \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$k_f = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i k_i}{\sum_{j=1}^n r_j A_{ij}} \quad \text{onde } A_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

onde μ_f é a viscosidade da mistura

k_f é a condutibilidade térmica da mistura

M_i é a massa molar do elemento i na mistura

Para o sistema estudado trabalharemos com uma substância simples. No caso todas as propriedades serão calculadas para o gás CO₂.

3.2 O isolamento térmico

O isolamento térmico, propõe-se a limitar as perdas de calor do sistema com o ambiente. Esquematizando o nosso sistema teremos:

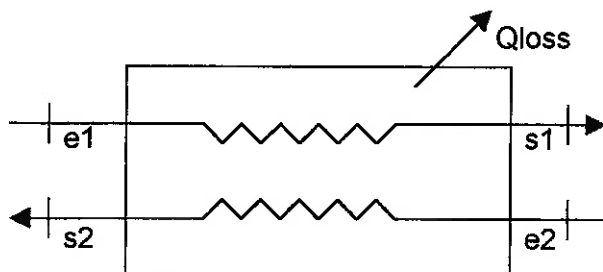


Fig.3 Esquema para o equacionamento da Perda de calor

Onde 1 e 2 representam os gases residuais e o vapor, respectivamente.

Sabemos, contudo, que a perda de calor para o ambiente (Q_{loss}) é diferente de zero e também as perdas axiais dos fluidos 1 e 2, assim como as perdas de carga envolvidas nos escoamentos de 1 e de 2.

Por sua vez, admitindo como hipótese simplificadora, as perdas axiais desprezíveis, uma vez que k_1 e k_2 são baixos, que é o caso a ser implementado (estudado); e a perda de carga igualmente desprezível, e como sabemos que a troca de calor é dada, em Osizic, por:

$$Q_{loss} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot (T_{interna} - T_{ambiente})$$

onde: $b - a$ é a espessura da parede da chaminé

h é a altura da chaminé

k é o coeficiente de troca de calor do material isolante

Tomando como T_i (temperatura interna) a média "ponderada" dos escoamentos dada por:

$$T_i = \frac{\sum m_e \cdot c_{p_e} \cdot T_e + \sum m_s \cdot c_{p_s} \cdot T_s}{\sum m_e \cdot c_{p_e} + \sum m_s \cdot c_{p_s}}$$

Onde os subscritos (e) e (s) se referem aos estados de entrada e saída dos fluidos dentro da chaminé. A perda de calor, apesar de ter sido tomado como objeto de pesquisa não será implementada na última parte deste trabalho. Consideraremos, portanto, que não haverá perda de calor para o ambiente. Para isso admitiremos como hipóteses simplificadoras que a espessura do isolante e o seu coeficiente de troca de calor sejam tais que, a perda de calor com o ambiente será mínima e, principalmente, não afetará sensivelmente a análise no restante do ciclo.

3.3 O superaquecedor

No superaquecedor haverá troca de calor entre os gases residuais e o vapor (no interior dos tubos), superaquecendo este, ou seja, levando o vapor, do estado saturado (na entrada 4), à superaquecido (na saída 5r); havendo perda de carga durante o escoamento dos dois fluidos.

Admitindo como hipóteses simplificadoras, que a perda de carga é desprezível, tanto para o vapor (no processo de superaquecimento, levando ao estado 5), quanto para os gases residuais, podemos representar o processo de calor como mostrado abaixo:

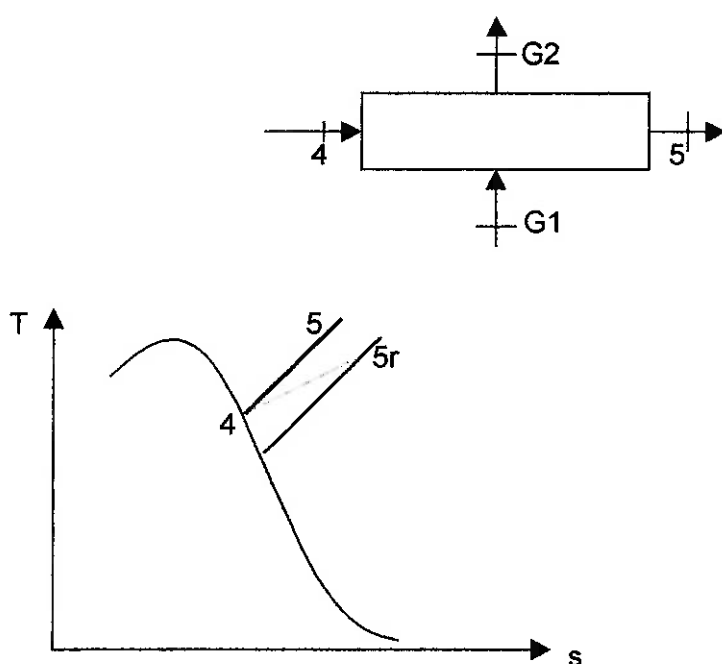


Fig.4 Variação de estados no superaquecedor (4-5r, com perda de carga e 4-5, sem perdas)

Como mostra Van Wylen, podemos equacionar, para o lado do vapor:

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot (h_5 - h_4)$$

Para o lado dos gases residuais teremos:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_g \cdot (h_{G1} - h_{G2})$$

Onde o Fluxo de calor no superaquecedor vai depender das características do trocador projetado (ou escolhido), pelos métodos mostrados no apêndice desse trabalho.

3.4 A Caldeira

Na caldeira haverá troca de calor entre os gases residuais e a água no interior dos tubos, aquecendo esta, até levá-la ao estado de vapor saturado seco, na saída.

Admitindo, como hipótese simplificadora, que os escoamentos darão-se sem perda de carga, definindo os estados 4 e G3, podemos representar:

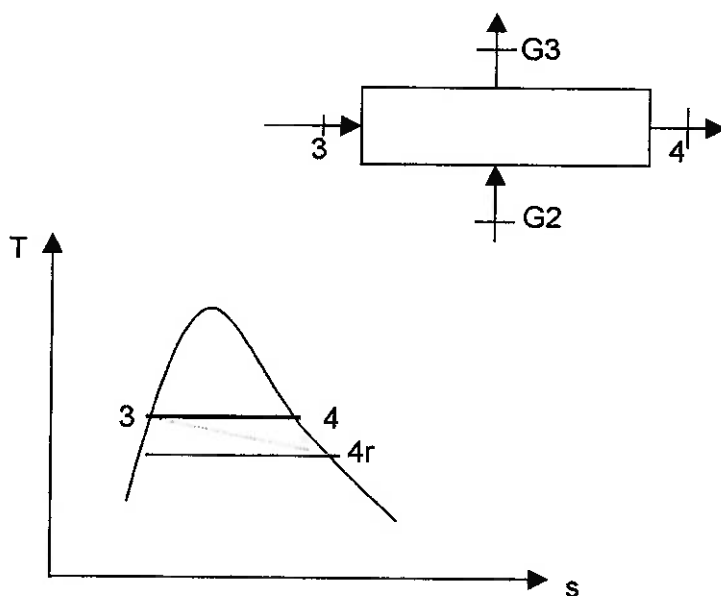


Fig.5 Variação de estados na caldeira
(3-4r, com perda de carga, 3-4, sem perdas)

Poderemos modelar a troca de calor, como nos mostra Van Wylen.

Logo, para o lado da água (vapor):

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3)$$

Para o lado dos gases residuais:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot (h_{G2} - h_{G3})$$

Onde o fluxo de calor na caldeira também vai depender das características de projeto da mesma, que estão melhor dispostas no apêndice deste.

3.5 O economizador

No economizador haverá troca de calor entre os gases residuais e os tubos, elevando a temperatura da água no interior destes, havendo também perdas de carga associadas aos escoamentos, representado na figura abaixo como estado 3r.

Porém, admitindo como hipótese simplificadora que os escoamentos se darão sem perda de carga, definindo o estado 3, poderemos representar e equacionar como mostrado abaixo:

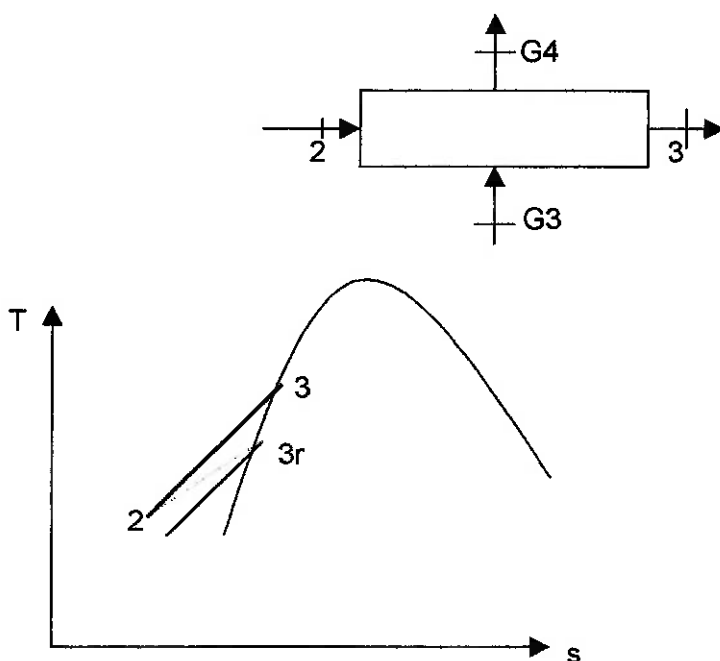


Fig.6 Variação de estados no economizador
(2-3r, com perda de carga; 2-3, sem perdas)

Como mostra Van Wylen, podemos equacionar, para o lado da água:

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$$

Para o lado dos gases residuais:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_g \cdot (h_{G3} - h_{G4})$$

Onde o fluxo de calor no economizador pode ser obtido pelas características de projeto (ou escolhidas) determinadas pelos métodos expostos no apêndice deste trabalho.

3.6 O compressor

No compressor haverá elevação da pressão da água, que se encontra nas condições ambiente (estado 1), até a pressão da linha de trabalho. Considerando as perdas por irreversibilidades, chegaremos ao estado 2r, como representado na figura 7.

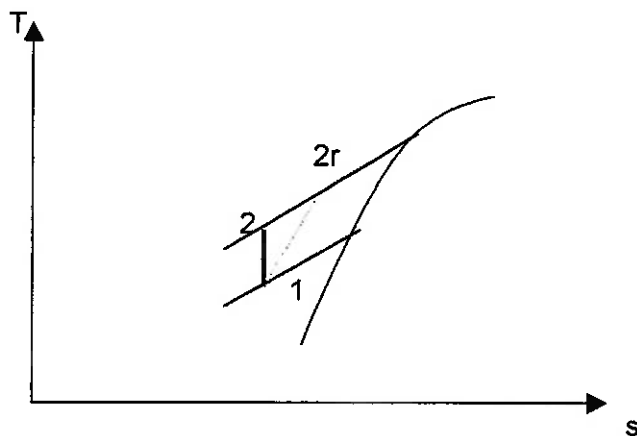


Fig. 7 Variação de estados na compressão
(1-2r, com irreversibilidades, 1-2, isentrópico)

Admitindo como hipótese simplificadora que o processo seja isentrópico, o que define o estado 2 (pressão P_{linha}), poderemos equacionar, segundo encontrado em McDonald e Van Wylem:

$$\dot{W}_C = \frac{\dot{v} \cdot (P_{linha} - p_1)}{\eta_C}$$

Onde o rendimento, pode ser encontrado em tabelas, ou curvas, como a exemplificada abaixo, em bibliografia que trate sobre máquinas de fluxo, ou mecânica dos fluidos. Algumas estão indicadas no final deste trabalho.

Por simplificação, adotaremos um valor fixo para o rendimento, que será mostrado na etapa de equacionamento e implementação no EES.



Fig.8 Ilustração da dependência entre rendimento e vazão num compressor

3.7 A turbina

Na turbina, haverá a expansão, desde o estado 5 até o estado 6r (definido segundo as perdas devido as irreversibilidades no processo), do vapor superaquecido (à pressão da linha), gerando trabalho. A variação é mostrada na figura abaixo.

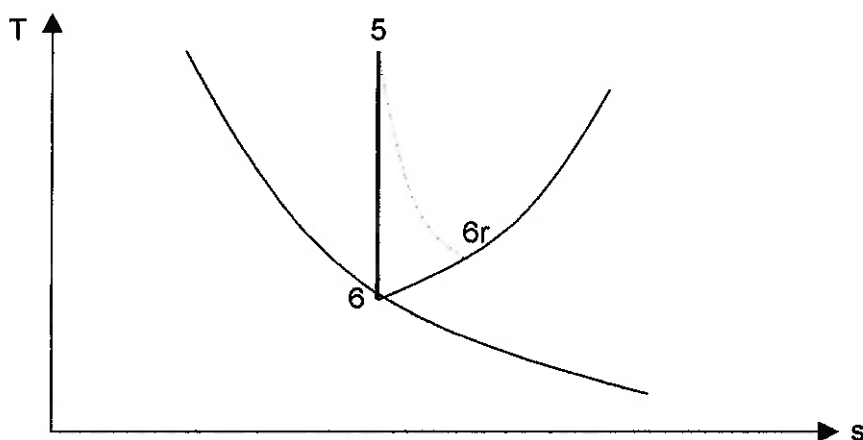


Fig.8 Variação de estados na turbina

Sabemos que o trabalho gerado na turbina é dado pela seguinte relação:

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6) \cdot \eta_t$$

Onde h_6 representa a entalpia considerando o processo isentrópico na expansão, e o rendimento representa o desvio da expansão isentrópica para a real, como representada na figura abaixo. Cabe notar que o rendimento pode ser obtido por tabelas (em função da vazão, por exemplo), ou gráficos, de acordo com os dados do fabricante. Exemplos numéricos são apresentados na bibliografia incluída no final deste trabalho.

Como simplificação adotaremos um valor fixo para o rendimento da turbina, que está apresentado na implementação da turbina, na 3ª parte deste trabalho.

O rendimento de uma turbina pode ser representado pela seguinte curva:

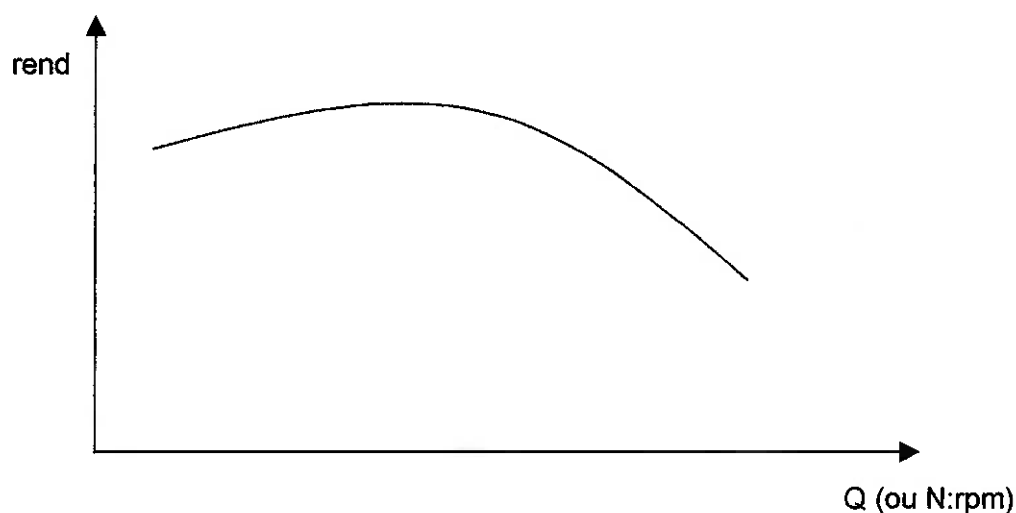
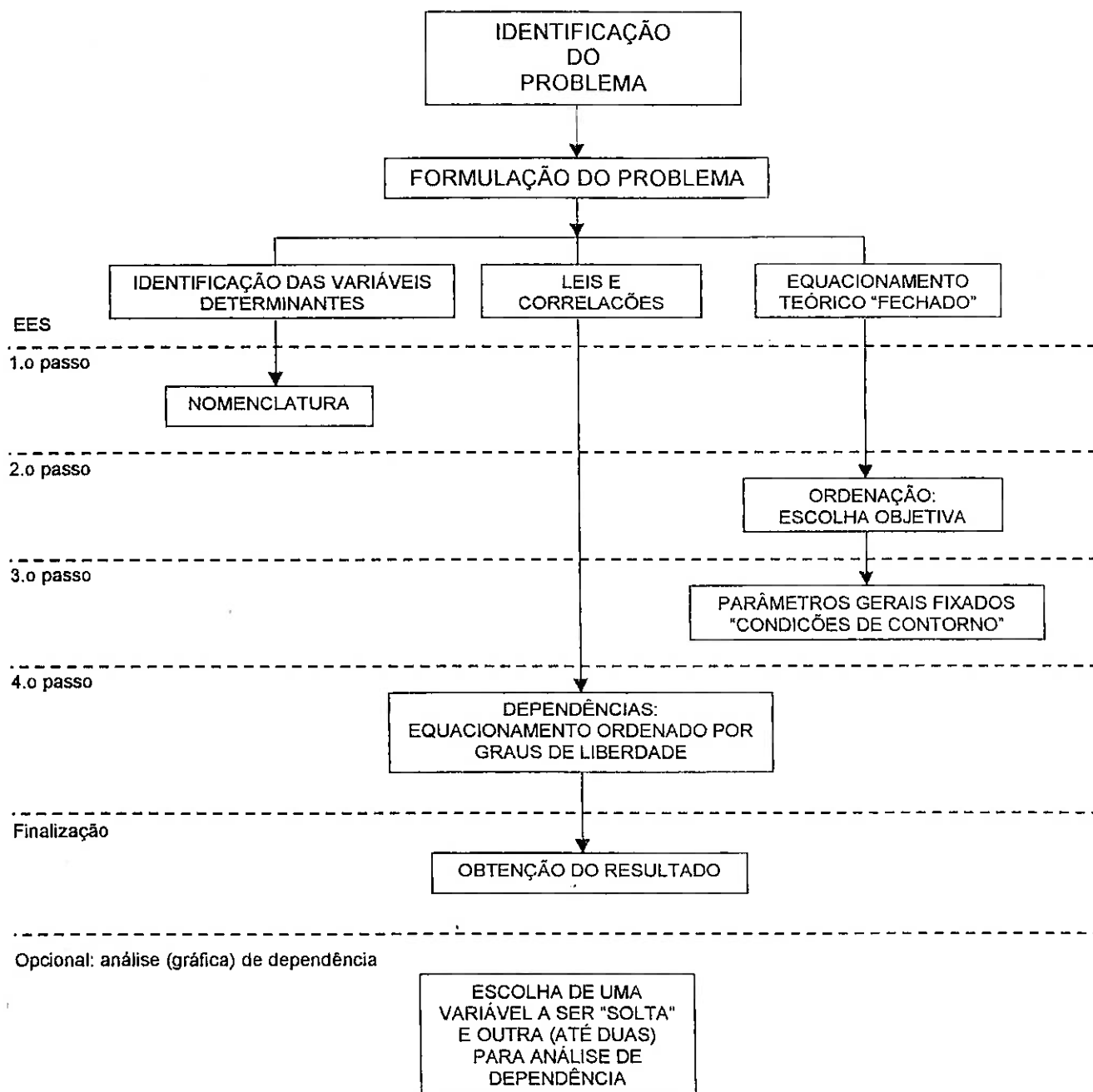


Fig.10 Ilustração da curva de rendimento em função da vazão (para a turbina)

Às vezes a curva é encontrada na forma de tabelas, isso varia de fabricante para fabricante. As equações dessa curva são encontradas facilmente na bibliografia indicada no final deste trabalho, principalmente na que diz respeito à máquinas de fluxo e mecânica dos fluidos.

Roteiro para implementação de Sistemas no EES (Engineering Equation Solver)

Fluxograma de equacionamento, implementação e análise no EES



4. Modelagem

O EES (Engineering Equation Solver) é um software muito poderoso, pois além de resolver e apresentar a solução de problemas matemáticos, possui, em seu “Ambiente”, a “capacidade” de calcular propriedades termodinâmicas de substâncias (ou algumas misturas); o que é perfeito para a solução e análise de problemas que envolvam tais necessidades

Ora, sendo o EES um solver (resolvedor) de equações, a implementação de qualquer sistema (de equações), implicará, antes, o estudo de algumas características inerentes a esse sistema. Não obstante, para o estudo dessas características, é necessário um profundo conhecimento da modelagem teórica do sistema físico em questão.

Abaixo estão relacionados os itens a serem desenvolvidos para essa análise e implementação.

4.1 Identificação do problema

Trata-se, nesse ponto, da escolha e/ou da proposição de um problema, abrangendo todo o escopo de interações a serem modeladas, equacionadas e analisadas. Há, portanto, necessidade de, além da proposição do problema, a busca, através da bibliografia disponível, de todas as formas em que o problema aparece abordado.

No nosso caso, o problema escolhido foi um ciclo de recuperação com cogeração de energia. Na bibliografia pesquisada deve constar, portanto, manuais de termodinâmica, transferência de calor, mecânica dos fluidos e máquinas hidráulicas

4.2 Formulação do problema

Depois de haver definido o problema no item anterior, resta a pergunta: Será que esse sistema, com essas interações, pode ser modelado (equacionado)?

Para que seja possível a implementação do sistema no EES, depois de respondida afirmativamente a pergunta acima, ainda resta uma pergunta mais restritiva: Será que o equacionamento das interações do sistema é fechado (além de ser completo, admite solução única)? Porque, se não for o caso, a implementação não poderá ser feita no EES.

Vou tentar explicar melhor. O EES “só” resolve sistemas de equações possíveis e determinados, portanto, tem de haver o mesmo número de equações e incógnitas, e além disso, é necessário que nenhuma dessas equações seja uma combinação “linear” de outras.

Vou dar um exemplo: Vamos supor que eu introduza as seguintes equações:

$$X+Y=5$$

$$2X+2Y=10$$

Nesse caso fica óbvio que foi introduzida apenas uma relação, pois há uma dependência linear entre as duas equações colocadas.

Agora, analise esse outro exemplo:

$$2.t + k = \frac{8}{x}$$

$$\frac{40}{x} - \ln(x) = 11.t$$

$$x = e^{-t+5.k}$$

Não está claro, mas essas equações são linearmente dependentes (de posto 1), ou seja, uma (e apenas uma) delas pode ser escrita como uma combinação linear das outras duas.

Agora, vamos supor que você tivesse pesquisado, nas bibliografias especializadas, a respeito do problema que você escolheu para resolver e analisar, e que numa delas você encontre, justamente, um equacionamento que não seja independente. Como saber?

Ora, o que garante a dependência ou independência “linear” do sistema de equações é a formulação adequada do sistema físico (ou matemático), daí a exigência,

mais que cabível, que todo “aventurando” na implementação de um sistema (de equações) no EES deva, a priori, dominar todos os conceitos – físicos e matemáticos – que estão inerentemente relacionados ao equacionamento do problema proposto.

4.2.1 Identificação das variáveis determinantes

Toda modelagem implica na escolha de variáveis que estão “ligadas” por meio de Leis e Correlações que foram obtidas na formulação teórica descrita acima. É sempre interessante ressaltar a importância de uma enumeração detalhada (se possível, uma catalogação) dessas variáveis, pois, como veremos adiante, a nomenclatura escolhida para cada uma delas é de profunda importância para a implementação do sistema de equações no EES.

4.2.2 Leis e correlações

Depois de definido o problema, no estágio de formulação, depois de escolhidas as variáveis a serem analisadas e relacionadas, é necessário que se faça uma pesquisa para verificar se tal problema (ou algumas de suas partes) já foi estudado e consequentemente modelado teoricamente; se esse não for o caso, teremos de interromper nossa implementação, pois estaríamos lidando com um sistema “aberto”, pois o número de equações seria menor que o número de incógnitas.

Nesse caso, poderíamos admitir alguma(s) hipótese(s) simplificadora(s), para introduzirmos um número maior de equações. Na verdade, sabemos que as modelagens teóricas sempre admitem hipóteses simplificadoras (mas restritivas). Daí, a necessidade de observância sobre a completude do alcance dessas hipóteses; que, se não for o caso (de completude), necessitaríamos “supor” mais algumas hipóteses, desde que isso não afetasse profundamente os fenômenos modelados, pois aí estaríamos deixando de tentar alcançar nosso objetivo, que é usar o Sistema (EES) para analisar, com o máximo de sua capacidade, o sistema, ou fenômeno físico proposto.

Ainda em relação à falta de correlações que tomem o sistema de equações fechado, poderíamos querer “testar” novas correlações num laboratório, mas aí a história seria outra...

4.2.3 Equacionamento teórico fechado

Cabe ressaltar mais uma vez que a implementação ficará comprometida se o sistema não estiver determinado – com o número de incógnitas igual ao número de equações, independentes. Portanto, nunca é demais fazer uma verificação detalhada das Leis e Correlações escolhidas para se modelar o sistema físico em questão, afim de identificar alguma inconsistência.

5. A Implementação

A implementação deverá, por conveniências descritas durante a explanação, seguir a ordem sugerida e descrita abaixo.

5.1 Nomenclatura

A nomenclatura citada acima se refere aos nomes que as variáveis irão assumir quando implementadas no EES, que por sua vez podem diferir (e muito) do nome usualmente atribuído a elas no equacionamento teórico. Isso se deve principalmente ao fato de o EES não apresentar um bom editor de equações. Apesar disso, o Sistema apresenta uma janela (Formatted Equations) onde as equações “aparecem” formatadas, mas infelizmente não podemos editá-las.

Nota-se que esse estágio está dois passos antes da implementação propriamente dita, pois, antes de começarmos a digitar as variáveis, suas relações ou seus valores, temos que conhecer seus nomes.

5.2 Ordenação (por uma escolha objetiva)

Esse é o passo que vem imediatamente antes da implementação propriamente dita (introdução dos valores e correlações), pois devemos determinar o que gostaríamos de obter (quais são as incógnitas?, Quais são os parâmetros que serão fixados?) a partir do que gostaríamos de fixar, ou o que das Leis e Correlações vai receber um “formato”.

Explicando melhor. Vamos supor que eu conheça a seguinte relação entre P e T:

$$T=250$$

$$P/T= 250$$

Daí obteríamos $P=1$ (na janela Solve Eq), sem complicações. E mais, se quiséssemos obter T ao invés de P, bastaria alterar na linha $T=250$, introduzindo $P=1$, ou o valor que se quisesse.

Por outro lado, vejamos o seguinte equacionamento:

$$P1=10$$

$$P1/T1=0.2$$

$$H=\text{enthalpy}(\text{CO}_2, P=P1, T=T1)$$

Nesse exemplo obtemos T1 e H, a partir de P1 e das outras duas “relações”. Agora vamos supor que quiséssemos obter P1 e T1, a partir de H. Se fôssemos seguir o exemplo anterior bastaria alterar, na linha onde se apresenta P1, colocarmos a linha apresentando H. Mas não daria certo, pois o EES, com a declaração $H=\text{enthalpy}(\text{CO}_2, P=P1, T=T1)$ assume, necessariamente, que a variável desconhecida seja obrigatoriamente H. Ou seja, o EES só aceita “propriedades” conhecidas como argumento para cálculo das outras, que são desconhecidas.

Daí a necessidade em conhecer todos os passos do processo de modelagem e formulação teórica e da escolha objetiva do que se quer analisar, a partir do que está sendo definido.

5.3 Parâmetros gerais fixados (condições de contorno)

Aqui começa a introdução das equações no EES. Uma vez no ambiente de trabalho, basta clicar no ícone Equation Window e começar a digitar.

Nesse passo deveremos introduzir os parâmetros que serão fixados, e que foram escolhidos no item anterior. Esses parâmetros devem estar no princípio da janela de equações.

Isso deve-se ao fato de o EES, caso não encontre um valor para uma variável que está envolvida numa relação declarada previamente, assumir um valor “aleatório” para essa variável (valor 0 para relações de soma e valor 1 para relações exponenciais); e se esse número não estiver dentro de uma faixa razoável de valores “possíveis” para a variável em questão, o sistema poderá não convergir para uma solução; o que seria muito ruim, pois não saberíamos se a divergência ocorre por erros e inconsistências na formulação, ou por essa característica do Ambiente (EES).

Como exemplo, posso citar que, parte deste trabalho – a implementação do sistema de equações no EES – levou cerca de 2 meses até que ficasse devidamente consistente e ordenado, pois o Ambiente, apesar de suas inúmeras vantagens, não oferece boas possibilidades para se “debugar” o programa implementado, além do desconhecimento, por minha parte, dessa propriedade do Sistema (EES)

Há ainda a possibilidade desses valores iniciais, chamados Guesses Values, serem alterados (mudados) numa janela apropriada.

Mas podemos, no entanto, evitar todo esse “trabalho” fazendo o máximo de declarações prévias de variáveis fixadas quanto for possível.

5.4 Dependências: Equacionamento Ordenado por Graus de Liberdade

Nesse passo serão introduzidas as chamadas Leis e Correlações, e que aqui chamaremos de dependências. O tal equacionamento por graus de liberdade nada mais é que respeitar uma ordem no equacionamento segundo o “aparecimento” de uma nova variável, em cada dependência introduzida, ou seja, ao invés de introduzirmos uma dependência entre várias variáveis que não foram declaradas, procuramos introduzir aquela que apresenta apenas uma nova variável, ou entre as dependências que temos, aquela que relacione o menor número de variáveis desconhecidas.

Isso acontece porque se introduzirmos, inicialmente, uma dependência com várias variáveis “livres”, o EES assumirá alguns valores iniciais para elas, o que pode causar o dano descrito acima.

Vou dar um exemplo. Suponhamos que eu tenha que introduzir as seguintes relações:

$$A \cdot B \cdot C \cdot D = 300$$

$$A = \text{enthalpy}(\text{CO}_2, P=B, T=C)$$

$$B + C = 65$$

$$B = 60$$

Da maneira que estão dispostas, ocasionarão um erro no sistema (EES), pois o mesmo, não sabendo os valores de A, B, C e D, inicialmente, “chutará” um valor. Mas esse valor não pode estar muito distante do esperado pela função enthalpy. Nesse exemplo os graus de liberdade estão em ordem decrescente.

A maneira correta de se introduzir o sistema de equações apresentado acima seria:

$$B = 60$$

$$B + C = 65$$

$$A = \text{enthalpy}(\text{CO}_2, P=B, T=C)$$

$$A * B * C * D = 300$$

Pois, por outro lado, se formos, introduzindo relações com um grau de liberdade (apenas uma variável livre) a mesma irá sendo determinada enquanto o “programa” for sendo executado. Nos casos onde isso não é possível, teremos que proceder como dito anteriormente, “entrar” na janela de Guesse Values e “chutar” um valor aproximado para nossa solução. Contudo, devemos sempre, tanto quanto possível, ir aumentando os graus de liberdade gradativamente.

5.5 Obtenção do resultado

Pronto, agora basta ir até a o ícone solve que a janela Solve Window será apresentada, com o valor de cada variável declarada, como condição de contorno ou relacionada nas dependências.

5.6 Análise de variação (dependente)

Depois de resolvido o problema, há a possibilidade de analisarmos a variação entre variáveis que sejam dependentes, direta ou indiretamente, no equacionamento efetuado. O procedimento será listado a seguir.

Escolhe-se uma variável a ser “solta” (tirada da janela de equações) e outras para serem analisadas. Depois de “solta” a variável em questão, abre-se o menu Tables e cria-se

uma tabela contendo essa variável e as outras que se quer analisar. Determinado o intervalo de variação da variável "solta" entra-se no menu Solve e clica-se Solve/Table. Onde aparecerá a tabela com os valores calculados (resolvidos) das outras variáveis em função daquela que foi "solta".

Também é possível traçar um gráfico de dependência de duas (no máximo) variáveis em função da variável "solta". Para isso entra-se no menu Plot Window e segue-se como determinado no manual.

No final desse trabalho há um exemplo dessa análise.

6. A Implementação no EES

6.1 O superaquecedor

Exemplo de Implementação: TROCA DE CALOR NO SUPERAQUECEDOR

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA: cálculo da área de troca de calor no superaquecedor.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA: a troca de calor é função de Re , Nu , Pr , da geometria do trocador, a área de troca, as condições de entrada e saída dos fluidos envolvidos.

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES (NOMENCLATURA): vazões mássicas de vapor e de gases residuais(m_p, m_g), propriedades de entrada e/ou saída (do vapor; dos gases) : entalpia(h_4, h_5), temperatura($T_4, T_5; T_{G1}, T_{G2}$), pressão(P_{linha}), calor específico ($c_{ps}; c_{pgs}$), condutibilidade térmica($k_{is}; k_{gs}$), viscosidade (μ_{is} , μ_{gs}), coeficiente global de troca no superaquecedor (U_s), coeficiente de troca externo(h_{os}), coeficiente de troca interno(h_{is}), efetividade no superaquecedor(E_s), área de troca (A_s), variáveis auxiliares para aplicação do método E-Nut (Efetividade).

ORDENAÇÃO (PARÂMETROS GERAIS FIXADOS): h_4, T_4 (determinados pelas condições de saturação à P_{linha}), T_5, T_{G1}

DEPENDÊNCIAS (EQUACIONAMENTO):

$$Nu_{is} = 0.023 \cdot Re_{is}^{0.8} \cdot Pr_{is}^{0.4}$$

correlação para troca interna

$$Nu_{os} = 0.35 \cdot Re_{os}^{0.6} \cdot Pr_{os}^{0.36}$$

correlação para troca externa

$$U_s = 1 / (1/h_{os} + 1/h_{is})$$

coeficiente global de troca

$$C_s = C_{mins} / C_{maxs}$$

$$N_s = A_s \cdot U_s / C_{\min s}$$

$$E_s = 1 - \exp(-1/C_s \cdot (1 - \exp(-N_s \cdot C_s)))$$

efetividade do superaquecedor

$$Q_s = E_s \cdot C_{\min s} \cdot (T_{G1} - T_4)$$

calor trocado, método da efetividade

$$Q_s = m_p \cdot (h_5 - h_4)$$

calor trocado, lado do vapor

$$Q_s = m_g \cdot c_{pgs} \cdot (T_{G1} - T_{G2})$$

calor trocado, lado dos gases

OBTENÇÃO DO RESULTADO: área de troca no superaquecedor (A_s), número de fileiras de tubos no superaquecedor (m_s)

ANÁLISE DE DEPENDÊNCIAS: variável escolhida (livre): W_t

variáveis dependentes: m_s , T_{G2} .

Essa análise está ilustrada no final deste trabalho, nos anexos.

6.2 A caldeira

Exemplo de Implementação: TROCA DE CALOR NA CALDEIRA

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA: cálculo da área de troca de calor na caldeira.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA: a troca de calor é função de Re , Nu , Pr , da geometria do trocador, a área de troca, as condições de entrada e saída dos fluidos envolvidos.

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES (NOMENCLATURA): vazões mássicas de vapor e de gases residuais(m_p, m_g), propriedades de entrada e/ou saída (do vapor; dos gases) : entalpia(h_3, h_4), temperatura($T_3, T_4; T_{G2}, T_{G3}$), pressão(P_{linha}), calor específico ($c_{pc}; c_{pgc}$), condutibilidade térmica($k_{ic}; k_{gc}$), viscosidade (μ_{ic} , μ_{gc}), coeficiente global de troca no superaquecedor (U_c), coeficiente de troca externo(h_{oc}), coeficiente de troca interno(h_{ic}), efetividade no superaquecedor(E_c), área de troca (A_c), variáveis auxiliares para aplicação do método E-Nut (Efetividade).

ORDENAÇÃO (PARÂMETROS GERAIS FIXADOS): h_3, T_3 (determinados pelas condições de saturação à P_{linha}), T_4, T_{G2}

DEPENDÊNCIAS (EQUACIONAMENTO):

$$Nu_{ic} = 0.023 \cdot Re_{ic}^{0.8} \cdot Pr_{ic}^{0.4}$$

correlação para troca interna

$$Nu_{oc} = 0.35 \cdot Re_{oc}^{0.6} \cdot Pr_{oc}^{0.36}$$

correlação para troca externa

$$U_c = 1 / (1/h_{oc} + 1/h_{ic})$$

coeficiente global de troca

$$C_c = C_{minc} / C_{maxc}$$

$$N_s = A_s \cdot U_s / C_{mins}$$

$$E_c = 1 - \exp(-1/C_c \cdot (1 - \exp(-N_c \cdot C_c)))$$

efetividade do superaquecedor

$$Q_c = E_c \cdot C_{minc} \cdot (T_{G2} - T_3)$$

calor trocado, método da efetividade

$$Q_c = m_p \cdot (h_4 - h_3)$$

calor trocado, lado do vapor

$$Q_c = m_g \cdot c_{pgs} \cdot (TG_2 - TG_3)$$

calor trocado, lado dos gases

OBTENÇÃO DO RESULTADO: área de troca na caldeira (A_c), número de fileiras de tubos na caldeira (m_c).

6.3 O economizador

Exemplo de Implementação: **TROCA DE CALOR NO ECONOMIZADOR**

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA: cálculo da área de troca de calor no economizador.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA: a troca de calor é função de Re , Nu , Pr , da geometria do trocador, a área de troca, as condições de entrada e saída dos fluidos envolvidos.

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES (NOMENCLATURA): vazões mássicas de vapor e de gases residuais(m_p, m_g), propriedades de entrada e/ou saída (do vapor; dos gases) : entalpia(h_2, h_3), temperatura($T_2, T_3; T_{G3}, T_{G4}$), pressão(P_{linha}), calor específico ($c_{pe}; c_{pge}$), condutibilidade térmica($k_{ie}; k_{ge}$), viscosidade (μ_{ie} , μ_{ge}), coeficiente global de troca no economizador (U_e), coeficiente de troca externo(h_{oe}), coeficiente de troca interno(h_{ie}), efetividade no economizador (E_e), área de troca (A_e), variáveis auxiliares para aplicação do método E-Nut (Efetividade).

ORDENAÇÃO (PARÂMETROS GERAIS FIXADOS): h_3, T_3 (determinados pelas condições de saturação à P_{linha}), T_2, T_{G3}

DEPENDÊNCIAS (EQUACIONAMENTO):

$$Nu_{ie} = 0.023 \cdot Re_{ie}^{0.8} \cdot Pr_{ie}^{0.4}$$

correlação para troca interna

$$Nu_{oe} = 0.35 \cdot Re_{oe}^{0.6} \cdot Pr_{oe}^{0.36}$$

correlação para troca externa

$$U_e = 1 / (1/h_{oe} + 1/h_{ie})$$

coeficiente global de troca

$$C_e = C_{mine} / C_{maxe}$$

$$N_e = A_e \cdot U_e / C_{mine}$$

$$E_e = 1 - \exp(-1/C_e \cdot (1 - \exp(-N_e \cdot C_e)))$$

efetividade do superaquecedor

$$Q_e = E_e \cdot C_{mine} \cdot (T_{G3} - T_2)$$

calor trocado, método da efetividade

$$Q_e = m_p \cdot (h_3 - h_2)$$

calor trocado, lado do vapor

$$Q_e = m_g \cdot c_{pge} \cdot (T_{G3} - T_{G4})$$

calor trocado, lado dos gases

OBTENÇÃO DO RESULTADO: área de troca no economizador (A_e), número de fileiras de tubos no economizador (m_e).

6.4 A turbina

Exemplo de Implementação: A EXPANSÃO DO VAPOR NA TURBINA

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA: cálculo da entalpia de entrada na turbina

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA: a entalpia de entrada pode ser obtida através da relação entre a potência que se deseja retirar do ciclo, dos estados de entrada e saída da turbina e do seu rendimento.

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES (NOMENCLATURA): potência da turbina (W_t), rendimento da turbina ($rend_t$), pressão de entrada P5 (P_{linha}), pressão de saída P6 (P_{amb}), temperatura de saída T6.

ORDENAÇÃO (PARÂMETROS GERAIS FIXADOS): W_t , P_{linha} , P_{amb} , $rend_t$, T6.

DEPENDÊNCIAS (EQUACIONAMENTO):

$W_t=2500$	potência da turbina
$rend_t=0.85$	rendimento da turbina
$P_5=P_{linha}$	pressão de entrada na turbina
$P_6=P_{amb}$	pressão de saída da turbina
$T_6=100$	temperatura de saída da turbina
$h_6=enthalpy(Steam, T=T_6, P=P_6)$	entalpia de saída da turbina
$W_t=mp*(h_5-h_6)*rend_t$	determinação de h_5 (estado 5)
$T_5=TEMPERATURE(Steam, P=P_5, T=T_5)$	o estado 5 fica determinado

OBTENÇÃO DO RESULTADO: o estado de entrada na turbina, P5 e T5 determinados, como mostrado acima.

6.5 O compressor

Exemplo de Implementação: A COMPRESSÃO DA ÁGUA NA BOMBA

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA: cálculo do trabalho de compressão na bomba de alimentação do sistema.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA: o trabalho é função dos estados de entrada e saída da bomba, da vazão e do rendimento da mesma.

IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES (NOMENCLATURA): o trabalho de compressão W_c , o rendimento do compressor (bomba) $rend_c$, as pressões de entrada (1 bar) e saída P_{linha} , o volume específico v (à P_{linha}) e a vazão mp .

ORDENAÇÃO (PARÂMETROS GERAIS FIXADOS): $rend_c$, v , determina-se W_c

DEPENDÊNCIAS (EQUACIONAMENTO):

$rend_c = 0.75$

rendimento da bomba

$v = \text{VOLUME}(H_2O, T=25, P=1)$

volume específico

$W_c = (mp \cdot v \cdot (P_{linha} - P_{amb}) \cdot 100) / rend_c$

trabalho de compressão

OBTENÇÃO DO RESULTADO: o trabalho de compressão W_c

7. Análises e Conclusões

Considerando que o projeto (trabalho) aqui apresentado consta de três partes distintas, podemos dividir essa análise também em três partes: sobre a formulação teórica, sobre o roteiro de implementação e sobre os resultados obtidos.

7.1 Sobre a formulação teórica

A respeito da formulação teórica podemos ressaltar que a escolha do problema a ser analisado – Ciclo de Recuperação com Cogeração de Energia – foi muito “feliz”. Pois, além de desenvolvermos esse trabalho em algo “novo” como o EES, para que a formulação estivesse condizente com as necessidades do projeto proposto inicialmente, tivemos que recorrer às bibliografias especializadas em cada um dos assuntos envolvidos na análise da formulação do problema, ou seja, tivemos que consultar manuais de termodinâmica, mecânica dos fluidos, transferência de calor, centrais termoelétricas, etc., o que nos proporcionou, além de uma revisão dos assuntos que foram abordados durante os cursos da graduação, um contato com a aplicabilidade prática de tais fundamentos. Passando por toda a parte de busca, organização e integração dos assuntos pertinentes à resolução do projeto.

Logo, podemos dizer que em relação a busca, organização, integração e revisão de conceitos, essa primeira parte do projeto nos deixou satisfeitos, pois esses objetivos foram alcançados com segurança.

7.2 Sobre o roteiro de implementação

A esse respeito podemos dizer que, em relação ao objetivo inicial, que era apresentar um roteiro (por um método didático) para a implementação de qualquer sistema no EES; e apesar de ninguém ainda aproveitar o método aqui proposto, podemos garantir a sua eficácia, pois ele foi desenvolvido e aplicado na implementação do Ciclo de Recuperação tratado neste trabalho.

Considerando ainda que esse roteiro é a parte fundamental deste projeto, gostaríamos de deixar claro que ele se propõe a orientar todo “aventurando” na implementação de qualquer sistema no ambiente EES, de uma forma clara e precisa, mas que, como trabalho inicial que é, fica aberto a críticas e sugestões, e mesmo alterações, que espero, sejam colocadas por todos aqueles que gostam de trabalhar com esse software, cuja potencialidade – em parte – nos foi mostrada, mas que sabemos ser de grande escopo.

7.3 Sobre os resultados obtidos

Pelos resultados obtidos chegamos a conclusão que nossa formulação, considerando as hipóteses simplificadoras, foi validada, pois obtivemos resultados compatíveis com os apresentados na literatura especializada, como mostra BASKAKOV (pág.354), as termoelétricas que funcionam com vazões da ordem simulada (5-10 kg/s), à temperatura para o vapor da ordem de 400 °C, apresentam uma potência retirada da ordem de 2-5 MW, que foi o obtido pela nossa simulação.

Como não basta comparar casos isolados da literatura, também submetemos a formulação à análise feita sob a variação de alguns parâmetros, buscando expor a mesma (a formulação) a uma análise de sensibilidade. Notamos, porém que os resultados também mantiveram-se dentro do esperado, como mostra a análise feita entre a variação da potência da turbina e os resultados obtidos para a temperatura de entrada na mesma (vapor superaquecido) e do número total de tubos (mt) do sistema de recuperação. Essa variação é encontrada no final deste trabalho (nos anexos).

Não podemos deixar de enfatizar que, a obtenção deste resultado deveu-se a um trabalho rigoroso de depuração de erros e inconsistências, que apesar de longo e cansativo, ajudou a entender melhor, tanto a própria formulação do problema quanto os detalhes da sua implementação no sistema (EES).

Também podemos enfatizar que, quanto a resultados numéricos, os mesmos podem ainda ser melhorados, pois como a intenção deste trabalho não foi o de apenas

estudar (exaustivamente) os ciclos de recuperação – e sim apresentar um roteiro de implementação de sistemas no EES – acabamos por adotar hipóteses simplificadoras que ainda podem ser “melhoradas” – apesar disto não comprometer a validade dos resultados obtidos pela nossa implementação.

Concluindo, o trabalho aqui exposto, apesar de curto, seguiu a sua proposição em sua totalidade, pois apresentou um problema da área de enfoque do nosso interesse (Energia), apresentou uma formulação responsável dos fenômenos físicos envolvidos (com suas respectivas hipóteses), apresentou, de maneira didática, um roteiro claro de implementação no software escolhido para a simulação (EES) com os respectivos exemplos de implementação – do problema proposto –, ainda mostrando resultados compatíveis com os esperados.

Por isso, temos, claramente, a consciência de que nosso tempo dispendido não foi em vão, e que, além de ter servido aos nossos propósitos esse trabalho venha a agradar, senão ajudar, àqueles que estão dispostos a ingressar nessa área de trabalho e pesquisa tão abrangente e instigadora, que é a área de Energia e Fluidos.

Apêndice

A1. Legenda

A_t	área de troca de calor
A_{\min}	área mínima para escoamento
c_p	calor específico à pressão constante
d	diâmetro
d_h	diâmetro hidráulico
$h_{1,2,3,4,5}$	entalpia
$h_{o,i}$	coeficiente de troca de calor
k	condutibilidade térmica
\dot{Q}	fluxo de calor
r	fração molar
T	temperatura
U_m	coeficiente global de troca de calor
$\dot{W}_{c,t}$	trabalho de compressão e expansão
μ	viscosidade
ρ	massa específica
η	rendimento

Subscritos

1,2,3,4,5	estados do fluido de trabalho
G1,G2,G3,G4	estados dos gases residuais
e,s,f,q	entrada, saída, frio e quente, respectivamente
i,j	elemento i, ou j
i,o	interno, externo

É importante observar que as variáveis que foram implementadas no programa estão devidamente explicitadas no mesmo, não carecendo serem colocadas nessa legenda.

A2. Adimensionais e outras grandezas

$$Nu = \frac{h.d}{k} \quad (\text{Nusselt})$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{Prandtl})$$

$$Re = \frac{G.D_h}{\mu} \quad (\text{Reynolds})$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{min}} = \rho \cdot v \cdot \frac{s_t}{s_t - d} \quad (\text{Vazão mássica})$$

$$D_h = \begin{cases} \frac{4.L.A_{min}}{A} \\ \text{ou} \\ D \end{cases} \quad \begin{array}{l} (\text{diâmetro hidráulico}) \\ ; \text{ para escoamento no interior de dutos circulares} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{min} = \min \left[(\dot{m}.c_p)_{frio}; (\dot{m}.c_p)_{quente} \right] \\ C_{max} = \max \left[(\dot{m}.c_p)_{frio}; (\dot{m}.c_p)_{quente} \right] \\ C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \\ N = \frac{A.U_m}{C_{min}} \end{array} \right\} \quad \text{correlações para o método da efetividade}$$

A3. Determinação do coeficiente de troca de calor global (U_m)

Sabemos por Özisic, que o coeficiente de troca global U_m , baseado na superfície interna do tubo é definido por:

$$U_m = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \left(\frac{1}{2k}\right) D_i \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{D_i}{D_o} \cdot \left(\frac{1}{h_o}\right)}$$

Mas quando a espessura da parede for pequena e a condutibilidade térmica for muito alta, a resistência térmica do tubo pode ser desprezada e a equação acima se reduz a:

$$U_m = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

A3.1 Cálculo do coeficiente de troca de calor na corrente interna (h_i)

Para determinação do coeficiente de troca de calor na corrente interna usaremos a equação de Dittus-Boelter:

$$Nu_i = 0.023 \cdot Re_i^{0.8} \cdot Pr_i^{0.4}$$

A3.2 Cálculo do coeficiente de troca de calor na corrente externa (h_o)

Para cálculo do coeficiente de troca de calor na corrente externa usaremos a correlação encontrada em Zakauskas:

$$Nu_o = 0.35 \cdot Re_o^{0.6} \cdot Pr_o^{0.36}$$

A4. Resolução de trocadores de calor

Entende-se por resolver de um trocador de calor, conhecer os estados iniciais e finais dos fluidos envolvidos, bem como a geometria do trocador e todas as propriedades de troca de calor do mesmo.

Existem dois métodos para a resolução de trocadores de calor: o método DTML, ou método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica, que não será tratado neste trabalho; e o Método da Efetividade (E-Nut), que foi o método escolhido para desenvolvimento deste trabalho.

A4.1 O Método da Efetividade (E-Nut)

Este método foi desenvolvido por Kays e London e é comumente empregado quando não se conhecem os estados finais (de saída) dos fluidos envolvidos.

Por esse método, o fluxo de calor no trocador é dado por:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{\text{entrada, fluido quente}} - T_{\text{entrada, fluido frio}})$$

Onde :

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} 1 - e^{\frac{1}{C} \cdot N^{0.22} \cdot e^{(-C \cdot N^{0.78} - 1)}} \\ \text{ou} \\ 1 - e^{-N} \text{ para a caldeira} \end{array} \right\}$$

e N e C são dados no apêndice A.2

É interessante notar que, se for desconhecida a geometria do trocador (Área e forma), mas forem conhecidos os estados iniciais e finais dos fluidos envolvidos, a mesma (geometria) poderá ser determinada. Pois, conhecendo-se os estados dos fluidos, determina-se o calor trocado, por sua vez, conhecendo-se as temperaturas de entrada no trocador, a efetividade dada acima fica conhecida; e que, acaba determinando o valor

de N , da onde podemos calcular a Área de troca do referido trocador de calor, pela relação apresentada em A.2.

Por outro lado, o problema também fica resolvido caso se conheça a geometria do trocador, e os estados iniciais dos fluidos envolvidos (que é o caso clássico da aplicação do método da efetividade). Pois, conhecendo-se a geometria do trocador e as vazões mássicas, determinam-se N e C , daí determina-se a efetividade, que por sua vez, junto com as temperaturas iniciais dos fluidos envolvidos, determina-se o fluxo de calor trocado, da onde pode-se determinar as condições finais de ambos os fluidos envolvidos.

Cabe ainda ressaltar que empregaremos nesse trabalho o primeiro método descrito acima, pois, por escolha, queremos implementar um programa que apresente como resultado, definida a forma do trocador de calor, a Área de troca (ou o número de fileiras de tubos), necessários para a recuperação da energia disponível nos gases de escape, e que será definida como uma das condições prévias para o dimensionamento em questão.

Bibliografia

- BASKAKOV, A. P. Termotecnia. Moscou, Ed. Mir, 1985.
- BENNET, C. O.; MYERS, J. E. Fenômenos de Transporte. São Paulo, SP, McGraw-Hill, 1978.
- EES: Engineering Equation Solver for Microsoft Windows Operating Systems. Middleton, WI, F-Chart Software. 1998.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ, Ed. Guanabara, 1988.
- KAYS, W. M.; LONDON, A. L. Compact Heat Exchange. 3ª ed. New York, NW, McGraw-Hill, 1984.
- PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK. 7ª ed. New York, NW, McGraw-Hill, 1995.
- ÖZISIC, M. N., Transferência de Calor – um texto básico. Rio de Janeiro, RJ, McGraw-Hill, 1990.
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. Mecânica dos Fluidos. 7ª ed. São Paulo, SP, McGraw-Hill, 1982.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica da USP. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses, São Paulo, 1991.
- WYLEN, G. V.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, 4ª ed., São Paulo, SP, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1997.

Anexos

Listagem do programa

"Parâmetros gerais"

n=10	"tubos em escoamento frontal"
l=1.2	"comprimento médio transversal ao fluxo"
d=0.03	"diâmetro dos tubos"
Dh=sqrt(n*d^2)	"diâmetro hidráulico, lado da água"
Dhg=0.3633E-2	"diâmetro hidráulico, lado dos gases, tabelado"
mp=5	"vazão mássica de água"
mg=30	"vazão mássica dos gases de escape"
st=2*d	"passo transversal"
Ach=pi*(dch)^2/4	"área de escoamento pela chaminé"
dch=2	"diâmetro da chaminé"
Aesc=pi*(d^2)/4*n	"área de escoamento interna"
TG1=700	"temperatura de entrada dos gases de escape"
Pamb=1	"pressão atmosférica"
Plinha=20	"pressão da linha"
Reir=(mp*4)/(pi*Dh*muir)	"Reynolds de referência, escoamento interno"
muir=VISCOSITY(Steam,T=100,P=0.1)	"viscosidade nas condições de referência"
Reor=((mg/Ach)*(st/d))*Dhg/mugr	"Reynolds de referência, escoamento externo"
mugr=VISCOSITY(CO2,T=TG1)	"viscosidade dos gases na entrada"

"EQUACIONAMENTO PARA A TURBINA"

Wt=2500	"potência gerada na turbina em kW"
rendt=0.85	"rendimento da turbina"
P5=Plinha	"pressão de entrada, na turbina"
P6=Pamb	"pressão de saída, na turbina"
T6=100	"temperatura de saída, na turbina"
h6=ENTHALPY(Steam,T=T6,P=P6)	"entalpia de saída da turbina"
Wt=mp*(h5-h6)*rendt	"determina-se h5, que com P5 (Plinha), determina o estado 5"
T5=TEMPERATURE(Steam,P=P5,h=h5)	

"EQUACIONAMENTO NO SUPERAQUECEDOR"

h4=ENTHALPY(Steam,x=1,P=Plinha)	"entalpia na entrada do superaquecedor"
T4=TEMPERATURE(Steam,h=h4,P=Plinha)	"temperatura na entrada do superaquecedor"
cpgs=SPECHHEAT(CO2,T=(TG1+TG2)/2)	"calor específico dos gases"
cps=SPECHHEAT(Steam,T=(T4+T5)/2,P=Plinha)	"calor específico do vapor"
kis=CONDUCTIVITY(Steam,T=(T4+T5)/2,P=Plinha)	"condutibilidade térmica do vapor"
kgs=CONDUCTIVITY(CO2,T=TG1)	"condutibilidade térmica dos gases"
muir=VISCOSITY(Steam,T=(T4+T5)/2,P=Plinha)	"viscosidade do vapor"
mugs=VISCOSITY(CO2,T=TG1)	"viscosidade dos gases"
Nuis=0.023*Reis^0.8*Pris^0.4	"correlação para troca de calor interna"
Nuos=0.35*Reos^0.6*Pros^0.36	"correlação para troca de calor externa"
Reis=(Reir*muir)/muir	"adimensional, Reynolds interno"
Reos=(Reor*mugs)/mugs	"adimensional, Reynolds externo"
Pris=(cps*muir)/kis*1000	"adimensional, Prandtl interno"
Pros=(cpgs*mugs)/kgs*1000	"adimensional, Prandtl externo"
Nuis=(his*d)/kis	"adimensional, Nusselt interno"
Nuos=(hos*Dhg)/kgs	"adimensional, Nusselt externo"
Us=1/(1/hos+1/his)	"coeficiente global de troca de calor"

Cs=Cmins/Cmaxs
 Cmins=min(mp*cps,mg*cpgs)
 Cmaxs=max(mp*cps,mg*cpgs)
 Ns=(As*Us)/(Cmins*1000)

Qs=mp*(h5-h4)	"calor trocado, lado do vapor"
Qs=mg*cpgs*(TG1-TG2)	"calor trocado, lado dos gases"
Qs=Es*Cmins*(TG1-T4)	"calor trocado, método da efetividade"
Es=1-exp(-1/Cs*(1-exp(-Ns*Cs)))	
As=pi*d*n*l*ms	

"EQUACIONAMENTO NA CALDEIRA"

$h3 = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}, x=0, P=P_{\text{linha}})$
 $T3 = \text{TEMPERATURE}(\text{Steam}, h=h3, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{cpgc} = \text{SPECHEAT}(\text{CO2}, T=TG2)$
 $\text{cpc1} = \text{SPECHEAT}(\text{Steam}, T=T3-1, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{cpc2} = \text{SPECHEAT}(\text{Steam}, T=T4+2, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{cpc} = (\text{cpc1} + \text{cpc2})/2$
 $\text{kic1} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Steam}, T=T3-1, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{kic2} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Steam}, T=T4+2, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{kic} = (\text{kic1} + \text{kic2})/2$
 $\text{kgc} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{CO2}, T=TG2)$
 $\text{muic1} = \text{VISCOSITY}(\text{Steam}, T=T3-1, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{muic2} = \text{VISCOSITY}(\text{Steam}, T=T4+2, P=P_{\text{linha}})$
 $\text{muic} = (\text{muic1} + \text{muic2})/2$
 $\text{mugc} = \text{VISCOSITY}(\text{CO2}, T=TG2)$
 $\text{Nuic} = 0.023 \cdot \text{Reic}^{0.8} \cdot \text{Pric}^{0.4}$
 $\text{Nuoc} = 0.35 \cdot \text{Reoc}^{0.6} \cdot \text{Proc}^{0.36}$
 $\text{Reic} = (\text{Reir} \cdot \text{muir})/\text{muic}$
 $\text{Reoc} = (\text{Reor} \cdot \text{mugr})/\text{mugc}$
 $\text{Pric} = (\text{cpc} \cdot \text{muic})/\text{kic} \cdot 1000$
 $\text{Proc} = (\text{cpgc} \cdot \text{mugc})/\text{kgc} \cdot 1000$
 $\text{Nuic} = (h_{\text{ic}} \cdot d)/\text{kic}$
 $\text{Nuoc} = (h_{\text{oc}} \cdot D_{\text{hg}})/\text{kgc}$
 $\text{Uc} = 1/(1/h_{\text{oc}} + 1/h_{\text{ic}})$

$\text{Cc} = \text{Cminc}/\text{Cmaxc}$
 $\text{Cminc} = \min(\text{mp} \cdot \text{cpc}, \text{mg} \cdot \text{cpgc})$
 $\text{Cmaxc} = \max(\text{mp} \cdot \text{cpc}, \text{mg} \cdot \text{cpgc})$
 $\text{Nc} = (\text{Ac} \cdot \text{Uc})/(\text{Cminc} \cdot 1000)$

$\text{Qc} = \text{mp} \cdot (h4 - h3)$
 $\text{Qc} = \text{mg} \cdot \text{cpgc} \cdot (TG2 - TG3)$
 $\text{Qc} = \text{Ec} \cdot \text{Cmaxc} \cdot (TG2 - T3)$
 $\text{Ec} = 1 - \exp(-\text{Nc})$
 $\text{Ac} = \pi \cdot d^2 \cdot i \cdot n \cdot \text{mc}$

"entalpia na entrada do superaquecedor"
 "temperatura na entrada do superaquecedor"
 "calor específico dos gases"

"calor específico do vapor"

"condutibilidade térmica do vapor"
 "condutibilidade térmica dos gases"

"viscosidade do vapor"
 "viscosidade dos gases"
 "correlação para troca de calor interna"
 "correlação para troca de calor externa"
 "adimensional, Reynolds interno"
 "adimensional, Reynolds externo"
 "adimensional, Prandtl interno"
 "adimensional, Prandtl externo"
 "adimensional, Nusselt interno"
 "adimensional, Nusselt externo"
 "coeficiente global de troca de calor"

"EQUACIONAMENTO NO ECONOMIZADOR"

$T2 = 25$
 $h2 = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}, x=0, T=25)$
 $\text{cpge} = \text{SPECHEAT}(\text{CO2}, T=(TG3 + TG2)/2)$
 $\text{cpe} = \text{SPECHEAT}(\text{H2O}, T=(T3 + T2)/2)$
 $\text{kic} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{H2O}, T=(T3 + T2)/2)$
 $\text{kge} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{CO2}, T=TG1)$
 $\text{muie} = \text{VISCOSITY}(\text{H2O}, T=(T2 + T3)/2)$
 $\text{muge} = \text{VISCOSITY}(\text{CO2}, T=TG1)$
 $\text{Nuie} = 0.023 \cdot \text{Reie}^{0.8} \cdot \text{Prie}^{0.4}$
 $\text{Nuoe} = 0.35 \cdot \text{Reoe}^{0.6} \cdot \text{Proe}^{0.36}$
 $\text{Reie} = (\text{Reir} \cdot \text{muir})/\text{muie}$
 $\text{Reoe} = (\text{Reor} \cdot \text{mugr})/\text{muge}$
 $\text{Prie} = (\text{cpe} \cdot \text{muie})/\text{kic} \cdot 1000$
 $\text{Proe} = (\text{cpge} \cdot \text{muge})/\text{kge} \cdot 1000$
 $\text{Nuie} = (h_{\text{ie}} \cdot d)/\text{kic}$
 $\text{Nuoe} = (h_{\text{oe}} \cdot D_{\text{hg}})/\text{kge}$
 $\text{Ue} = 1/(1/h_{\text{oe}} + 1/h_{\text{ie}})$

$\text{Ce} = \text{Cmine}/\text{Cmaxe}$
 $\text{Cmine} = \min(\text{mp} \cdot \text{cpe}, \text{mg} \cdot \text{cpge})$
 $\text{Cmaxe} = \max(\text{mp} \cdot \text{cpe}, \text{mg} \cdot \text{cpge})$
 $\text{Ne} = (\text{Ae} \cdot \text{Ue})/(\text{Cmine} \cdot 1000)$

"calor específico dos gases"
 "calor específico do vapor"
 "condutibilidade térmica da água"
 "condutibilidade térmica dos gases"
 "viscosidade da água"
 "viscosidade dos gases"
 "correlação para troca de calor interna"
 "correlação para troca de calor externa"
 "adimensional, Reynolds interno"
 "adimensional, Reynolds externo"
 "adimensional, Prandtl interno"
 "adimensional, Prandtl externo"
 "adimensional, Nusselt interno"
 "adimensional, Nusselt externo"
 "coeficiente global de troca de calor"

$$Q_e = m_p \cdot (h_3 - h_2)$$

"calor trocado, lado da água"

$$Q_e = m_g \cdot c_{pgc} \cdot (TG_3 - TG_4)$$

"calor trocado, lado dos gases"

$$Q_e = E_e \cdot C_{minc} \cdot (TG_3 - 25)$$

"calor trocado, método da eficiência"

$$E_e = 1 - \exp(-1/C_e \cdot (1 - \exp(-N_e \cdot C_e)))$$

$$A_e = \pi \cdot d \cdot n \cdot l \cdot m_e$$

"área de troca no economizador"

"MODELAGEM DA BOMBA DE ALIMENTAÇÃO"

$$\text{rendc} = 0.75$$

"rendimento do compressor"

$$v = \text{VOLUME}(\text{H}_2\text{O}, T=25, P=1)/1000$$

$$W_c = (m_p \cdot v \cdot (P_{\text{linha}} - 1) \cdot 100) / \text{rendc}$$

"trabalho de compressão"

Parâmetros gerais

$$\begin{aligned}
 n &= 10 && \text{tubos em escoamento frontal} \\
 l &= 1.2 && \text{comprimento médio transversal ao fluxo} \\
 d &= 0.03 && \text{diâmetro dos tubos} \\
 Dh &= \sqrt{n \cdot d^2} && \text{diâmetro hidráulico, lado da água} \\
 Dhg &= 0.003633 && \text{diâmetro hidráulico, lado dos gases, tabelado} \\
 mp &= 5 && \text{vazão mássica de água} \\
 mg &= 30 && \text{vazão mássica dos gases de escape} \\
 st &= 2 \cdot d && \text{passo transversal} \\
 Ach &= \pi \cdot \frac{dch^2}{4} && \text{área de escoamento pela chaminé} \\
 dch &= 2 && \text{diâmetro da chaminé} \\
 Aesc &= \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot n && \text{área de escoamento interna} \\
 TG1 &= 700 && \text{temperatura de entrada dos gases de escape} \\
 Pamb &= 1 && \text{pressão atmosférica} \\
 Plinha &= 20 && \text{pressão da linha} \\
 Reir &= \frac{mp \cdot 4}{\pi \cdot Dh \cdot \mu_{ir}} && \text{Reynolds de referência, escoamento interno} \\
 \mu_{ir} &= \text{Visc}('Steam', T=100, P=0.1) && \text{viscosidade nas condições de referência} \\
 Reor &= \frac{mg}{Ach} \cdot \left[\frac{st}{st - d} \right] \cdot Dhg && \text{Reynolds de referência, escoamento externo} \\
 \mu_{gr} &= \text{Visc}('CO2', T=TG1) && \text{viscosidade dos gases na entrada}
 \end{aligned}$$

EQUACIONAMENTO PARA A TURBINA

$$\begin{aligned}
 Wt &= 2500 && \text{potência gerada na turbina em kW} \\
 rendt &= 0.85 && \text{rendimento da turbina} \\
 P5 &= Plinha && \text{pressão de entrada, na turbina} \\
 P6 &= Pamb && \text{pressão de saída, na turbina} \\
 T6 &= 100 && \text{temperatura de saída, na turbina} \\
 h6 &= h('Steam', T=T6, P=P6) && \text{entalpia de saída da turbina} \\
 Wt &= mp \cdot (h5 - h6) \cdot rendt && \text{determina-se } h5, \text{ que com } P5 \text{ (Plinha), determina o estado 5} \\
 T5 &= T('Steam', P=P5, h=h5)
 \end{aligned}$$

EQUACIONAMENTO NO SUPERAQUECEDOR

$$T4 = T('Steam', h=h4, P=Plinha) \quad \text{temperatura na entrada do superaquecedor}$$

$$cp_{gs} = Cp\left['CO2', T = \frac{TG1 + TG2}{2}\right] \quad \text{calor específico dos gases}$$

$$c_{ps} = Cp\left['Steam', T = \frac{T4 + T5}{2}, P=Plinha\right] \quad \text{calor específico do vapor}$$

$$k_{is} = k\left['Steam', T = \frac{T4 + T5}{2}, P=Plinha\right] \quad \text{condutibilidade térmica do vapor}$$

$$k_{gs} = k\left['CO2', T=TG1\right] \quad \text{condutibilidade térmica dos gases}$$

$$\mu_{is} = Visc\left['Steam', T = \frac{T4 + T5}{2}, P=Plinha\right] \quad \text{viscosidade do vapor}$$

$$\mu_{gs} = Visc\left['CO2', T=TG1\right] \quad \text{viscosidade dos gases}$$

$$Nu_{is} = 0.023 \cdot Re_{is}^{0.8} \cdot Pr_{is}^{0.4} \quad \text{correlação para troca de calor interna}$$

$$Nu_{os} = 0.35 \cdot Re_{os}^{0.6} \cdot Pr_{os}^{0.36} \quad \text{correlação para troca de calor externa}$$

$$Re_{is} = \frac{Re_{ir} \cdot \mu_{is}}{\mu_{is}} \quad \text{adimensional, Reynolds interno}$$

$$Re_{os} = \frac{Re_{or} \cdot \mu_{gs}}{\mu_{gs}} \quad \text{adimensional, Reynolds externo}$$

$$Pr_{is} = \frac{c_{ps} \cdot \mu_{is}}{k_{is}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl interno}$$

$$Pr_{os} = \frac{c_{ps} \cdot \mu_{gs}}{k_{gs}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl externo}$$

$$Nu_{is} = \frac{h_{is} \cdot d}{k_{is}} \quad \text{adimensional, Nusselt interno}$$

$$Nu_{os} = \frac{h_{os} \cdot D_{hg}}{k_{gs}} \quad \text{adimensional, Nusselt externo}$$

$$U_s = \frac{1}{\frac{1}{h_{os}} + \frac{1}{h_{is}}} \quad \text{coeficiente global de troca de calor}$$

$$C_s = \frac{C_{mins}}{C_{maxs}}$$

$$C_{mins} = \text{Min}(m_p \cdot c_{ps}, m_g \cdot c_{pgs})$$

$$C_{maxs} = \text{Max}(m_p \cdot c_{ps}, m_g \cdot c_{pgs})$$

$$N_s = \frac{A_s \cdot U_s}{C_{mins} \cdot 1000}$$

$$Q_s = m_p \cdot (h_5 - h_4) \quad \text{calor trocado, lado do vapor}$$

$$Q_s = m_g \cdot c_{pgs} \cdot (TG1 - TG2) \quad \text{calor trocado, lado dos gases}$$

$$Q_s = E_s \cdot C_{mins} \cdot (T_{G1} - T_4) \quad \text{calor trocado, método da efetividade}$$

$$E_s = 1 - \exp \left[\frac{-1}{C_s} \cdot (1 - \exp(-N_s \cdot C_s)) \right]$$

$$A_s = \pi \cdot d \cdot n \cdot l \cdot m_s$$

EQUACIONAMENTO NA CALDEIRA

$$h_3 = h('Steam', x=0, P=P_{linha}) \quad \text{entalpia na entrada do superaquecedor}$$

$$T_3 = T('Steam', h=h_3, P=P_{linha}) \quad \text{temperatura na entrada do superaquecedor}$$

$$c_{pgc} = C_p('CO_2', T=T_{G2}) \quad \text{calor específico dos gases}$$

$$c_{pc1} = C_p('Steam', T=T_3 - 1, P=P_{linha})$$

$$c_{pc2} = C_p('Steam', T=T_4 + 2, P=P_{linha})$$

$$c_{pc} = \frac{c_{pc1} + c_{pc2}}{2} \quad \text{calor específico do vapor}$$

$$k_{ic1} = k('Steam', T=T_3 - 1, P=P_{linha})$$

$$k_{ic2} = k('Steam', T=T_4 + 2, P=P_{linha})$$

$$k_{ic} = \frac{k_{ic1} + k_{ic2}}{2} \quad \text{condutibilidade térmica do vapor}$$

$$k_{gc} = k('CO_2', T=T_{G2}) \quad \text{condutibilidade térmica dos gases}$$

$$\mu_{ic1} = \text{Visc}('Steam', T=T_3 - 1, P=P_{linha})$$

$$\mu_{ic2} = \text{Visc}('Steam', T=T_4 + 2, P=P_{linha})$$

$$\mu_{ic} = \frac{\mu_{ic1} + \mu_{ic2}}{2} \quad \text{viscosidade do vapor}$$

$$\mu_{gc} = \text{Visc}('CO_2', T=T_{G2}) \quad \text{viscosidade dos gases}$$

$$Nu_{ic} = 0.023 \cdot Re_{ic}^{0.8} \cdot Pr_{ic}^{0.4} \quad \text{correlação para troca de calor interna}$$

$$Nu_{oc} = 0.35 \cdot Re_{oc}^{0.6} \cdot Pr_{oc}^{0.36} \quad \text{correlação para troca de calor externa}$$

$$Re_{ic} = \frac{Re_{ir} \cdot \mu_{ir}}{\mu_{ic}} \quad \text{adimensional, Reynolds interno}$$

$$Re_{oc} = \frac{Re_{or} \cdot \mu_{gc}}{\mu_{gc}} \quad \text{adimensional, Reynolds externo}$$

$$Pr_{ic} = \frac{c_{pc} \cdot \mu_{ic}}{k_{ic}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl interno}$$

$$Pr_{oc} = \frac{c_{pgc} \cdot \mu_{gc}}{k_{gc}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl externo}$$

$$Nu_{ic} = \frac{h_{ic} \cdot d}{k_{ic}} \quad \text{adimensional, Nusselt interno}$$

$$h_{oc} \cdot D_{ha}$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_{oc}} + \frac{1}{h_{ic}}} \quad \text{coeficiente global de troca de calor}$$

$$C_c = \frac{C_{\min c}}{C_{\max c}}$$

$$C_{\min c} = \text{Min}(m_p \cdot c_{pc}, m_g \cdot c_{pgc})$$

$$C_{\max c} = \text{Max}(m_p \cdot c_{pc}, m_g \cdot c_{pgc})$$

$$N_c = \frac{A_c \cdot U_c}{C_{\min c} \cdot 1000}$$

$$Q_c = m_p \cdot (h_4 - h_3) \quad \text{calor trocado, lado do vapor}$$

$$Q_c = m_g \cdot c_{pgc} \cdot (TG_2 - TG_3) \quad \text{calor trocado, lado dos gases}$$

$$Q_c = E_c \cdot C_{\max c} \cdot (TG_2 - T_3) \quad \text{calor trocado, método da efetividade}$$

$$E_c = 1 - \exp(-N_c)$$

$$A_c = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \cdot m_c \quad \text{área de troca de calor, na caldeira}$$

EQUACIONAMENTO NO ECONOMIZADOR

$$T_2 = 25$$

$$h_2 = h('Steam', x=0, T=25)$$

$$c_{pge} = C_p \left['CO_2', T = \frac{TG_3 + TG_2}{2} \right] \quad \text{calor específico dos gases}$$

$$c_{pe} = C_p \left['H_2O', T = \frac{T_3 + T_2}{2} \right] \quad \text{calor específico do vapor}$$

$$k_{ie} = k \left['H_2O', T = \frac{T_3 + T_2}{2} \right] \quad \text{condutibilidade térmica da água}$$

$$k_{ge} = k('CO_2', T=TG_1) \quad \text{condutibilidade térmica dos gases}$$

$$\mu_{iue} = \text{Visc} \left['H_2O', T = \frac{T_2 + T_3}{2} \right] \quad \text{viscosidade da água}$$

$$\mu_{uge} = \text{Visc}('CO_2', T=TG_1) \quad \text{viscosidade dos gases}$$

$$Nu_{ie} = 0.023 \cdot Re_{ie}^{0.8} \cdot Pr_{ie}^{0.4} \quad \text{correlação para troca de calor interna}$$

$$Nu_{oe} = 0.35 \cdot Re_{oe}^{0.8} \cdot Pr_{oe}^{0.36} \quad \text{correlação para troca de calor externa}$$

$$Re_{ie} = \frac{Re_{ir} \cdot \mu_{iur}}{\mu_{iue}} \quad \text{adimensional, Reynolds interno}$$

$$Re_{oe} = \frac{Re_{or} \cdot \mu_{ogr}}{\mu_{uge}} \quad \text{adimensional, Reynolds externo}$$

$$Pr_{ie} = \frac{c_{pe} \cdot \mu_{iue}}{k_{ie}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl interno}$$

$$Pr_{oe} = \frac{c_{pge} \cdot \mu_{ge}}{k_{ge}} \cdot 1000 \quad \text{adimensional, Prandtl externo}$$

$$Nu_{ie} = \frac{h_{ie} \cdot d}{k_{ie}} \quad \text{adimensional, Nusselt interno}$$

$$Nu_{oe} = \frac{h_{oe} \cdot D_{hg}}{k_{ge}} \quad \text{adimensional, Nusselt externo}$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_{oe}} + \frac{1}{h_{ie}}} \quad \text{coeficiente global de troca de calor}$$

$$C_e = \frac{C_{mine}}{C_{maxe}}$$

$$C_{mine} = \text{Min}(m_p \cdot c_{pe}, m_g \cdot c_{pge})$$

$$C_{maxe} = \text{Max}(m_p \cdot c_{pe}, m_g \cdot c_{pge})$$

$$N_e = \frac{A_e \cdot U_e}{C_{mine} \cdot 1000}$$

$$Q_e = m_p \cdot (h_3 - h_2) \quad \text{calor trocado, lado da água}$$

$$Q_e = m_g \cdot c_{pge} \cdot (TG_3 - TG_4) \quad \text{calor trocado, lado dos gases}$$

$$Q_e = E_e \cdot C_{minc} \cdot (TG_3 - 25) \quad \text{calor trocado, método da eficiência}$$

$$E_e = 1 - \exp\left[\frac{-1}{C_e} \cdot (1 - \exp(-N_e \cdot C_e))\right]$$

$$A_e = \pi \cdot d \cdot n \cdot l \cdot m_e \quad \text{área de troca no economizador}$$

MODELAGEM DA BOMBA DE ALIMENTAÇÃO

$$\text{rendc} = 0.75 \quad \text{rendimento do compressor}$$

$$v = \frac{v('H_2O', T=25, P=1)}{1000}$$

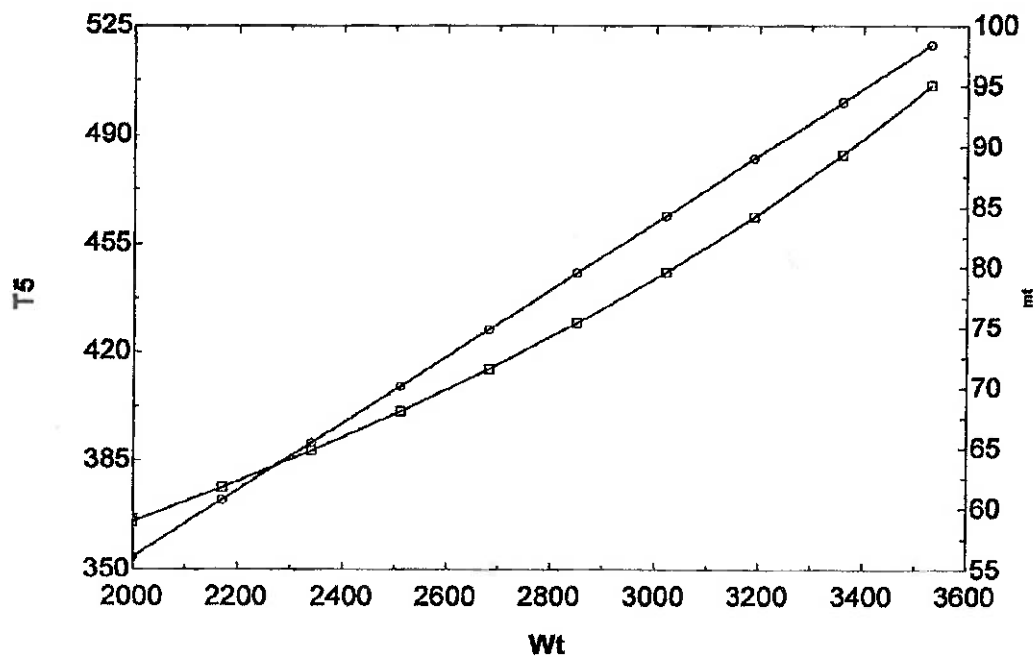
$$W_c = \frac{m_p \cdot v \cdot (P_{linha} - 1) \cdot 100}{\text{rendc}} \quad \text{trabalho de compressão}$$

Listagem dos resultados

Unit Settings: [C]/[bar]/[kg]/[degrees]

Ac = 39.35 [m2]	Ach = 3.142 [m2]	Ae = 22.76 [m2]	Aesc = 0.007069 [m2]
As = 14.63 [m2]	Cc = 0.5249	Ce = 0.2727	Cmaxc = 36.13
Cmaxe = 34.74	Cmaxs = 36.43	Cminc = 18.97	Cmine = 9.472
Cmins = 11.47	cpc = 3.793	cpc1 = 4.527	cpc2 = 3.059
cpe = 1.894	cpge = 1.204	cpge = 1.158	cpgs = 1.214
cps = 2.294	Cs = 0.3148	d = 0.03 [m]	dch = 2 [m]
Dh = 0.09487 [m]	Dhg = 0.003633 [m]	Ec = 0.6171	Ee = 0.6063
Es = 0.4179	h2 = 104.8 [kJ]	h3 = 908.6 [kJ]	h4 = 2797 [kJ]
h5 = 3264 [kJ]	h6 = 2676 [kJ]	hic = 14515	hie = 4575
his = 5906	hoc = 477.9	hoe = 496.2	hos = 504.8
kgc = 0.06286	kge = 0.06633	kgs = 0.06633	kic = 0.3494
kic1 = 0.6564	kic2 = 0.04244	kle = 0.0258	kis = 0.04749
l = 1.2 [m]	mc = 34.79 [fileiras]	me = 20.12 [fileiras]	mg = 30 [kg/s]
mp = 5 [kg/s]	ms = 12.94 [fileiras]	mugc = 0.00003714	muge = 0.00003896
mugr = 0.00003896	mugs = 0.00003896	muic = 0.00007153	muic1 = 0.0001268
muic2 = 0.00001624	muie = 0.00001285	muir = 0.00001234	muis = 0.00002052
n = 10 [tubos p/fila]	Nc = 0.96	Ne = 1.075	Ns = 0.5932
Nuic = 1246	Nuie = 5319	Nuis = 3731	Nuoc = 27.62
Nuce = 27.18	Nuos = 27.64	P5 = 20 [bar]	P6 = 1 [bar]
Pamb = 1 [bar]	Plinha = 20 [bar]	Pric = 0.7765	Prie = 0.9436
Pris = 0.9911	Proc = 0.7116	Proe = 0.6802	Pros = 0.7133
Qc = 9441 [kJ]	Qe = 4019 [kJ]	Qs = 2337 [kJ]	Relc = 938137
Reie = 5.2211E+06	Reir = 5.4363E+06	Reis = 3.2705E+06	rendc = 0.75
rendt = 0.85	Reoc = 1781	Reoe = 1781	Reor = 1781
Reos = 1781	st = 0.06 [m]	T2 = 25 [C]	T3 = 212.4 [C]
T4 = 212.4 [C]	T5 = 407.8 [C]	T6 = 100 [C]	TG1 = 700 [C]
TG2 = 635.9 [C]	TG3 = 374.6 [C]	TG4 = 263.3 [C]	Uc = 462.7
Ue = 447.7	Us = 465	v = 0.001376 [m3/kg]	Wc = 17.43 [kW]
Wt = 2500 [kW]			

Exemplo de análise de variação dependente (gráfico)



	T5	mt	Wt
Run 1	354.3	58.94	2000
Run 2	372.4	61.76	2170
Run 3	390.6	64.79	2340
Run 4	408.9	68.05	2510
Run 5	427.2	71.57	2680
Run 6	445.6	75.4	2850
Run 7	463.9	79.59	3020
Run 8	482.3	84.21	3190
Run 9	500.5	89.33	3360
Run 10	518.8	95.08	3530

