

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CIÊNCIAS TÉRMICAS

**DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UM PROGRAMA
COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE PLANTAS
TÉRMICAS E DE POTÊNCIA**

Vilson Francisco Maziero

Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: **Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos**
Co-orientador: **Prof. Dr. Emanuel RochaWoiski**

Ilha Solteira (SP), 20 de Dezembro de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M476d

Maziero, Vilson Francisco.

Desenvolvimento e teste de um programa computacional para simulação de plantas térmicas e de potência / Vilson Francisco Maziero. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012
136 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Ciências Térmicas, 2012

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos

Co-orientador: Emanuel Rocha Woiski

1. Termodinâmica. 2. Ciclos. 3. Simulação numérica. 4. Programa computacional.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Desenvolvimento e teste de um programa computacional para simulação de plantas térmicas e de potência.

AUTOR: VILSON FRANCISCO MAZIERO

ORIENTADOR: Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOÃO BATISTA APARECIDO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. PAULO HÉLIO KANAYAMA
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Cidade de São Paulo

Data da realização: 20 de Dezembro de 2012

Esta dissertação é dedicada à memória de minha Mãe Lourdes Francisca de Jesus Maziero e a meu pai Francisco Maziero, os quais não tiveram muitas oportunidades de estudo, mas sempre se preocuparam comigo e me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e oportunidades que me foram dadas até o dia de hoje.

A minha esposa Jeane de Fátima, a qual sempre me apoiou neste período de curso, me incentivando.

Ao meu amigo Prof. Dr. Paulo Helio Kanayama que, apesar da distância que nos separa e das poucas oportunidades que tivemos de conversarmos pessoalmente, foi uma pessoa de fundamental importância para a realização desse sonho.

Ao meu amigo, orientador e professor Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos, o qual me deu muita força e acreditou em mim nesse período de curso me direcionando e ajudando nos momentos difíceis, sem a seu apoio nada disso teria sido possível também.

Ao meu amigo, co-orientador e professor Dr. Emanuel Rocha Woiski, o qual admiro muito, pois sempre estive com as portas abertas para ouvir as minhas dúvidas e sugerir uma solução, com suas dicas nada fáceis, mas de fundamental importância.

Ao engenheiro mecânico e mestre Rodnei Passolongo, um grande amigo de Pós-Graduação, que me ajudou na parte de teste e equacionamento dos equipamentos, em que mais tive dificuldades.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e teste de um protótipo de um programa computacional para simulação de plantas térmica e de potência, com os principais recursos de programas comerciais existentes, com baixo custo e com interface gráfica mais amigável. O referido programa foi denominado TPPS (abreviação de *Thermal Power Plant Software*), tendo sido desenvolvido na linguagem *object pascal*, utilizando a IDE do DELPHI e a biblioteca FLUIDPROP, na qual constam os componentes para cálculo das propriedades termodinâmicas envolvidas. Para tanto, inicialmente é apresentada uma breve descrição de alguns programas computacionais disponíveis no mercado que comumente são utilizados no meio acadêmico sendo que, dentre eles, foram escolhidos três (Cycle-Tempo, EES e IPSEpro) para efeito comparativo dos resultados das simulações com o programa desenvolvido, tendo como base duas plantas básicas, uma de geração e outra de cogeração de energia. Foi utilizada uma metodologia de simulação que consiste na avaliação dos processos, dos dados e do resultado dos cálculos obtidos. Para tanto, foram consideradas as hipóteses de regime permanente; variações das energias cinéticas e potencial são desprezadas em virtude de se desejar apenas um simples comparativo de valores das propriedades termodinâmicas calculadas; processos adiabáticos em todos os equipamentos que fazem parte dos ciclos, exceto para trocadores de calor, para os quais um parâmetro de eficiência define a quantidade de calor transferida ao meio. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, tendo em vista que não houve discrepâncias entre os resultados obtidos por cada um dos programas, mostrando que a ferramenta desenvolvida, em sua primeira versão, atende os requisitos a que se propôs. Por fim, são apresentados resultados de uma simulação de uma planta de cogeração mais complexa, através do TPPS.

Palavras-chave: Ciclos termodinâmicos. Simulação numérica. Programa computacional.

ABSTRACT

This study aimed to develop and test a prototype of a computer program for simulation of thermal and power plants, with the main sources of existing commercial programs, with low cost and friendlier graphical interface. The program was denominated TPPS (abbreviation for Thermal Power Plant Software), and has been developed in Object Pascal language, using the Delphi IDE and FLUIDPROP library, which contains the components for calculating the thermodynamic properties involved. Therefore, initially presents a brief description of some computational programs available that are commonly utilized in the academic environment and among them, three were chosen (Cycle-Time, EES and IPSEpro) for comparison of the simulation results with the program developed, based on two basic plants, one of power generation and the other one of cogeneration. The simulation methodology consists of the evaluation of the processes, data and results obtained from the calculations. Therefore, it was considered the hypothesis of steady state and the variations of kinetic and potential energies were neglected because just a simple comparison of calculated values of thermodynamic properties; adiabatic processes in all devices of the cycles, except for heat exchangers, for which an efficiency parameter defines the amount of heat transferred to the environment. The results were quite satisfactory, considering that there were no discrepancies between the results obtained by each one of the programs, showing that the first version of the software developed meets the proposed requirements. Finally, results of simulation of a more complex cogeneration plant through the TPPS are presented.

Keywords: Thermodynamic cycles. Numerical simulation. Computational program.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histórico de simulação de processos.	22
Figura 2 - Modelo de planta exemplo, gerada no Cycle-Tempo.	45
Figura 3 - Matriz de deslocamento de massa gerada no Cycle-Tempo.	46
Figura 4 - Tela do programa EES para cálculo de um Ciclo de Rankine.	48
Figura 5 - Ambiente gráfico do programa EES.	48
Figura 6 - Interface da biblioteca do módulo MDK do programa IPSEpro.	50
Figura 7 - Layout de um ciclo térmico no módulo PSE do programa IPSEpro.	50
Figura 8 - Tela de uma planta desenvolvida no IPSEpro.	52
Figura 9 - Representação esquemática da estrutura do IPSEpro.	52
Figura 10 - Planta desenvolvida no programa GateCycle.	53
Figura 11 - Tela gráfica do programa Aspen Plus.	55
Figura 12 - Tela principal do programa TPPS.	57
Figura 13 - Estrutura de base de dados do programa TPPS.	58
Figura 14 - Tela de desenho do programa TPPS.	59
Figura 15 - Tela de resultados do cálculo no programa TPPS.	60
Figura 16 - Tela de criação de componentes no programa TPPS.	62
Figura 17 - Tela para criação de pontos de Entrada e Saída no aparato.	62
Figura 18 - Tela para criação de pontos de entrada e saída no aparato no programa TPPS.	63
Figura 19 - Conversão de notações INFIXA para POSFIXA no programa TPPS.	65
Figura 20 - Relatório de configuração de equipamento no programa TPPS.	66
Figura 21 - Modelo de comunicação entre o aplicativo e o FluidProp no programa TPPS.	69
Figura 22 - Funcionamento da estrutura de cálculo dos aparatos no programa TPPS.	70
Figura 23 - Tela de definição de variáveis e equacionamento do problema.	70
Figura 24 - Formatação da saída de dados no programa TPPS.	71
Figura 25 - Tela de saída de resultados no programa TPPS.	72
Figura 26 - Modelo de uma planta de geração de energia.	74
Figura 27 - Modelo da planta de cogeração de energia.	75
Figura 28 - Planta de geração resolvida pelo Cycle-Tempo.	77
Figura 29 - Planta de cogeração resolvida pelo Cycle-Tempo.	78
Figura 30 - Planta de geração resolvida pelo IPSEpro.	79
Figura 31 - Planta de cogeração resolvida pelo IPSEpro.	80

Figura 32 - Tela de resultados para ciclo de geração resolvido pelo EES.....	82
Figura 33 - Planta de cogeração resolvida no EES.....	85
Figura 34 - Planta de geração resolvida pelo programa TPPS.	87
Figura 35 - Planta de cogeração resolvida pelo programa TPPS.	90
Figura 36 - Planta de potência complexa.	96
Figura 37 - Comparação entre o processo de cogeração de energia e a produção.	106
Figura 38 - Diagrama de fluxo de energia típico de sistema de trigerção.	108
Figura 39 - Representação esquemática de um Ciclo de Rankine.....	112
Figura 40 - Representação esquemática de um Ciclo de Brayton.	114
Figura 41 - Representação esquemática de um ciclo combinado.....	116
Figura 42 - Representação de um ciclo com motor de combustão interna.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Programas computacionais para simulação termodinâmica.....	28
Tabela 2 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa Cycle-Tempo.....	77
Tabela 3 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa Cycle-Tempo.	78
Tabela 4 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa IPSEpro.	79
Tabela 5 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa IPSEpro.	80
Tabela 6 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa EES.....	82
Tabela 7 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa EES.	85
Tabela 8 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa TPPS.....	87
Tabela 9 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa TPPS.....	90
Tabela 10 - Comparativo da temperatura para a planta de geração.....	91
Tabela 11 - Comparativo da entalpia para a planta de geração.	91
Tabela 12 - Comparativo da entropia para a planta de geração.....	91
Tabela 13 - Comparativo da temperatura para a planta de cogeração.....	92
Tabela 14 - Comparativo da entalpia para a planta de cogeração.	92
Tabela 15 - Comparativo da entropia para a planta de cogeração.....	93
Tabela 16 - Comparativo de resultados do MATLAB e TPPS para uma planta complexa.	97
Tabela 17 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração.....	107
Tabela 18 - Conversão de símbolos do MATLAB para o TPPS.....	128

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

e	Exergia específica (kJ/kg)
$\dot{E}$	Fluxo de exergia (W)
F	Relação combustível/ar
$\dot{F}$	Fontes consumidas em base exergética (W)
h	Entalpia específica (kJ/kg)
$\bar{h}$	Entalpia específica molar, incluindo a entalpia de formação (kJ/kmol)
$\dot{I}$	Irreversibilidade (W)
$\dot{m}$	Fluxo de massa (kg/s)
$\dot{n}$	Número de moles do componente químico (kmol/s)
N	Número de anos
P	Pressão (kPa)
$\dot{P}$	Fontes produzidas em base exergética (W)
$\dot{Q}$	Fluxo de calor (kW)
s	Entropia específica (kJ/kg K)
S	Variável de conversão de tamanho ou capacidade do equipamento
$\dot{S}$	Taxa de entropia (kW)
T	Temperatura (°C)
T_a	Temperatura referente à água (°C)
T_g	Temperatura referente aos gases (°C)
$\dot{W}$	Potência (kW ou MW)
x	Fração molar
$\dot{Z}$	Taxa de custo não exergético (US\$/s)

Símbolos Gregos

α	Fator de escala em função do tipo de equipamento
β	Razão de compressão
ε^o	Exergia química <i>standard</i> (kJ/kmol)
δ	Porcentagem de irreversibilidades (%)
η	Eficiência ou rendimento baseado na primeira Lei da Termodinâmica (%)
ψ	Eficiência baseada na segunda lei da termodinâmica (%)

ϕ	Perda de pressão no trocador de calor (%)
μ	Potencial químico (kJ/kmol)

Subscritos

0	Estado de referência
ap	Referente ao <i>approach</i>
b	Referente ao bombeamento
C	Referente ao compressor
CC	Referente à câmara de combustão
CI	Custos de investimento
$comb$	Referente ao combustível
CR	Referente à caldeira de recuperação
DA	Referente ao desaerador
e	Entradas dos fluxos em cada volume de controle
ele	Referente à eletricidade
exp	Referente ao expensor ou turbina
f	Referente às propriedades físicas
g	Referente ao gerador elétrico
$gases$	Referente a gases de combustão
ger	Referente à geração
gn	Referente ao gás natural
i, k	Contadores
iso	Referente ao processo isentrópico
OM	Operação e manutenção
P	Referente aos produtos de combustão
pp	Referente ao <i>pinch point</i>
Q	Referente a calor
q	Referente às propriedades químicas
R	Referente aos reagentes
rev	Referente ao processo reversível
s	Saídas dos fluxos em cada volume de controle
t	Referente à total
TC	Trocador de calor
$teor$	Referente ao valor teórico

<i>TG</i>	Referente à turbina a gás
<i>TV</i>	Referente à Turbina a vapor
<i>vc</i>	Referente ao volume de controle
<i>w</i>	Referente ao trabalho

LISTA DE ABREVIACÕES

DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
UNESP	Universidade Estadual Paulista
NUPLEN	Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
CAPE	<i>Computer Aided Process Engineering</i>
CPES	<i>Chemical Process Evolution System</i>
CCPS	<i>Combined Cycle Power Stations</i>
IBM	<i>International Business Machines</i>
CHESS	<i>Chemical Engineering Simulation System</i>
EUA	Estados Unidos da América
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
GCO	<i>Global Cape Open</i>
TU	<i>Delft University of Technology</i>
JANAF	<i>Joint Army Navy Air Force</i>
MDK	<i>Model Development Kit</i>
PSE	<i>Process Simulation Environment</i>
HRSG	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>
DLL	<i>Dynamics Link Library</i>
IAPWS	<i>International Association for the Properties of Water and Steam</i>
DA	Desaerador
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPC	<i>Engineering, Procurement and Construction</i>
EVA	Evaporador de alta
TV	Turbina a vapor

SUMÁRIO

	PREFÁCIO	17
1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO	19
1.2	OBJETIVOS	20
2	PROCESSO DE SIMULAÇÃO	21
2.1	INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	21
2.2	HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	22
2.3	IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	23
2.4	ARQUITETURA BÁSICA E TIPOS DE SIMULADORES DE PROCESSOS	25
2.5	EXEMPLOS DE PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA	27
3	MODELAGEM TERMODINÂMICA	29
3.1	ANÁLISE ENERGÉTICA	29
3.1.1	Análise pela primeira Lei da Termodinâmica	29
3.1.2	Análise pela segunda Lei da Termodinâmica	30
3.2	ANÁLISE EXERGÉTICA	31
3.3	IRREVERSIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS	33
3.4	MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS DE UM CICLO TÉRMICO E DE POTÊNCIA	33
3.4.1	Modelagem dos equipamentos de um ciclo a gás	33
3.4.2	Modelagem dos componentes do ciclo a vapor	38
3.5	RENDIMENTO DE UM CICLO TÉRMICO E DE POTÊNCIA	42
4	CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS PROGRAMAS DISPONÍVEIS PARA SIMULAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA	44
4.1	PROGRAMA CYCLE-TEMPO	44
4.2	PROGRAMA EES	46
4.3	PROGRAMA IPSEPRO	49
4.4	PROGRAMA GATECYCLE	52
4.5	PROGRAMA ASPEN PLUS	53
5	CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DESENVOLVIDO	56
5.1	SOBRE O TPPS	56
5.2	CLASSES TFORMULA E TAPARATO NO PROGRAMA TPPS	67

6	SIMULAÇÕES DE PLANTAS DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO ATRAVÉS DE PROGRAMAS DISPONÍVEIS	73
6.1	DEFINIÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS	73
6.1.1	Planta de geração de energia	73
6.1.2	Planta de cogeração de energia	75
6.2	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA CYCLE-TEMPO.....	77
6.2.1	Simulação da planta geração no programa Cycle-Tempo	77
6.2.2	Simulação da planta de cogeração no programa Cycle-Tempo	78
6.3	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA IPSEPRO.....	79
6.3.1	Simulação da planta de geração com o programa IPSEpro	79
6.3.2	Simulação da planta de cogeração com programa IPSEpro	80
6.4	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA EES.....	81
6.4.1	Simulação da planta de geração com o programa EES	81
6.4.2	Simulação da planta de cogeração com o programa EES.....	83
6.5	SIMULAÇÃO UTILIZANDO O PROGRAMA TPPS	86
6.5.1	Simulação da planta de geração com o programa TPPS	86
6.5.2	Simulação da planta de cogeração com o programa TPPS	88
6.6	RESULTADOS COMPARATIVOS DAS SIMULAÇÕES DA PLANTA DE GERAÇÃO	91
6.7	RESULTADOS COMPARATIVOS DAS SIMULAÇÕES DA PLANTA DE COGERAÇÃO.....	92
7	RESOLUÇÃO DE UMA PLANTA TÉRMICA E DE POTÊNCIA COMPLEXA	94
7.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA A SER RESOLVIDO	94
7.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS PROGRAMAS MATLAB E TPPS	96
8	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A - ASPECTOS GERAIS DA COGERAÇÃO DE ENERGIA	104
	A.1 - DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO	104
	A.2 - HISTÓRICO DA COGERAÇÃO	105
	A.3 - APLICAÇÕES DA COGERAÇÃO.....	109
	APÊNDICE B - CICLOS TÉRMICOS E DE POTÊNCIAS.....	112
	B.1 - CICLO DE RANKINE	112
	B.2 - CICLO DE BRAYTON.....	113
	B.3 - CICLO COMBINADO.....	115

B.4 - CICLOS OTTO E DIESEL	117
----------------------------------	-----

APÊNDICE C - EQUACIONAMENTO DE UMA PLANTA TÉRMICA E DE POTÊNCIA	118
--	------------

C.1 - EQUACIONAMENTO PELO PROGRAMA MATLAB.....	119
--	-----

C.2 - EQUACIONAMENTO E RESOLUÇÃO DO PROBLEMA UTILIZANDO O TPPS	128
--	-----

PREFÁCIO

Este trabalho está inserido dentro das linhas de pesquisa do NUPLEN (Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e está estruturado em 8 Capítulos, cujos conteúdos são descritos brevemente a seguir.

No Capítulo 1 são explicados os motivos que levaram a execução deste trabalho fazendo uma introdução na área de mecânica computacional e também aborda o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem a simulação de processos, introduzindo-se neste assunto, e comentando também sobre o histórico da evolução da simulação, sua importância, vantagens e desvantagens mostrando os tipos de simuladores, sua arquitetura e exemplos de programas na área de simulação de plantas.

No Capítulo 3 são apresentadas a modelagem termodinâmica de acordo com a 1ª e 2ª Lei da termodinâmica para cada equipamento, bem como as modelagens dos equipamentos do Ciclo térmico, Ciclo a Gás e Ciclo a Vapor.

No Capítulo 4 é feito um estudo sobre as ferramentas de simulação e resolução de plantas térmicas utilizadas no meio acadêmico e é apresentado também o protótipo do programa desenvolvido no NUPLEN.

No Capítulo 5 são mostrados como foi desenvolvido o programa TPPS e algumas particularidades do ambiente.

No Capítulo 6 são mostrados os resultados da simulação de uma planta de Geração e uma de Cogeração, utilizando os programas disponíveis no NUPLEN e o protótipo do novo programa desenvolvido, sendo feita uma comparação entre os mesmos.

No Capítulo 7 o programa desenvolvido é testado para a resolução de um sistema de potência mais complexo, sendo depois feita a comparação com os resultados obtidos por meio da utilização do programa MATLAB e o TPPS.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice A é apresentada uma revisão sobre aspectos da cogeração de energia sua definição, histórico da cogeração e suas aplicações nos dias atuais.

No Apêndice B são abordados os ciclos térmicos e de potência mais comumente utilizados (Rankine, Brayton, Combinado, Otto e Diesel).

No Apêndice C são apresentados os equacionamentos utilizados no MATLAB e no programa TPPS para resolução da planta de potência apresentada no Capítulo 7.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia; o aumento da demanda de energia; o fortalecimento de opiniões em favor da criação de oportunidades para o avanço do sistema de geração distribuída utilizando fontes de energia primária; os recursos humanos necessários para o desenvolvimento da área de mecânica computacional; e a união desses profissionais das mais diversas áreas, tais como: engenharia, matemática e computação; fortalecem a utilização cada vez mais da simulação numérica e simulação de processos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o avanço da tecnologia surgiram novos conceitos de geração e de interligação de sistemas elétricos, otimizados de forma centralizada que, com o apoio das grandes centrais (hidrelétricas, termelétricas, nucleares, carvão, gás natural e óleo combustível), conseguiam fornecer energia abundante, e os sistemas de cogeração¹, foram, então, gradualmente perdendo participação no mercado.

No entanto, nas últimas décadas os setores energéticos passaram a conviver com “crises sistêmicas”, relacionadas com as dificuldades dos governos criarem condições políticas e econômicas para manter a estabilidade regulatória necessária para atrair fluxos regulares de recursos para investimentos e assegurar mecanismos que facilitem as exigências dos longos processos de licenciamento ambiental dos projetos, para assegurar o abastecimento de energia elétrica, em quantidade e qualidade compatível com o ritmo de crescimento econômico.

Por outro lado, com o aumento sustentado da demanda de energia elétrica; com as exigências crescentes do mercado por melhoria da qualidade do fornecimento para corresponder com o avanço da “robotização da economia”; e com a massificação do uso de computadores e da internet, os grandes sistemas centralizados de geração de energia passaram a ser exigidos em novas condições de operação e começaram a dar “sinais de vulnerabilidade”.

Essa tendência vem fortalecendo opiniões e promovendo decisões em favor da criação de oportunidade para o avanço dos “sistemas de geração distribuída”, através do qual os

¹ Ver Apêndice A - Aspectos gerais da cogeração de energia e Apêndice B - Ciclos térmicos e de potência.

clientes finais (indústria, comércio e serviços), utilizando fontes de energia primárias disponíveis (biomassa e/ou gás natural), produzem, consomem e administram as suas necessidades de energia elétrica e térmica, com fatores de eficiência energética e de custos posicionados conforme a visão estratégica dos seus empreendedores, gerando a necessidade de novas ferramentas que venham ao encontro desta tecnologia.

A área de mecânica computacional teve grande impulso pela disponibilidade de computadores potentes a preços acessíveis. Hoje, qualquer computador de mesa tem o poder de processamento de um supercomputador de 20 anos atrás e a simulação numérica está ao alcance de qualquer empresa, desde que tenham o programa e os recursos humanos adequados.

Os recursos humanos necessários para o desenvolvimento da área de mecânica computacional são diversos: precisa-se de pesquisadores para o desenvolvimento de modelos matemáticos para fenômenos físicos; de pesquisadores para aproximar esses modelos com algoritmos numéricos; de pesquisadores para o desenvolvimento de programas; e de engenheiros para utilizar esses programas e tirar conclusões adequadas.

Trata-se, por motivos óbvios, de uma área multidisciplinar de pesquisa, na qual engenheiros de todas as áreas de atuação, matemáticos e cientistas de computação, colaboram em uma área e com objetivos comuns.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver e testar o protótipo de um programa utilizando ambiente gráfico, para simulação de plantas de geração e cogeração de energia, avaliando o desempenho do aplicativo em níveis de baixa e média complexidade, fazendo um comparativo em relação aos programas já existentes no mercado e com isso criar uma ferramenta de baixo custo que possa futuramente ser melhorada e acrescida de novos recursos, disponibilizando o seu acesso a alunos de graduação e pós-graduação.

2 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

O ser humano possui uma grande capacidade de imaginação, os cérebros constantemente estão criando realidades alternativas, tanto a imaginação como a simulação são conceitos parecidos, na imaginação cria-se um sistema no qual a relação causa-efeito é imaginada e comparada com a realidade. A intuição está embutida como uma das capacidades mais refinadas da simulação, com ela um modelo refinado da realidade pode ser criado na mente para se tentar prever o que vai ocorrer sem se ter um modelo racional e uma visão mais clara da causa.

Dentre as áreas mais desenvolvidas da simulação estão as de ambientes virtuais, em jogos em computador ou na internet, onde pode haver interação e participação. Com o aumento da capacidade e melhoramento dos processadores, o realismo desses ambientes tem se tornado cada vez mais convincente. Esse tipo de simulação é um dos maiores motivos econômicos para o desenvolvimento de novas máquinas cada vez mais potentes.

Na área de simulação mecânica são simulados diversos fenômenos físicos, indo da área estrutural a simulação de fluidos e gases ou até mesmos circuitos elétricos ou de potência, envolvendo-se as mais diversas áreas tais como: engenharia, matemática e ciência da computação. Estes fenômenos podem ser representados por sistemas de equações, os quais podem ser solucionados por métodos numéricos. Após a simulação, os resultados obtidos são comparados com os fenômenos físicos em estudo.

2.1 INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

A simulação de processos permite ao pesquisador testar alternativas de um modelo teórico em computador, antes de realizar um experimento na prática, poupando os custos do insucesso no emprego de políticas e práticas não aderentes às necessidades e oportunidades da organização. Nas indústrias químicas, petroquímicas e de projetos de equipamentos, a simulação é cada vez mais utilizada para estudos de ampliação de capacidade, avaliação de unidades e concepção de novas tecnologias. A parte de análise térmica, que é o foco do trabalho também, é muito utilizada e conta com muitos programas disponíveis no mercado, os quais tem recursos para fornecer dimensionamento, análises de custos e otimizações requeridas nos projetos.

Os avanços na computação são enormes e isto tem impulsionado uma nova onda de aplicações da simulação de processos, o que tem permitido melhorá-los, bem como conceber

novos projetos de maneira eficaz a custos reduzidos. A tecnologia, também conhecida genericamente como CAPE (*Computer Aided Process Engineering*), está conquistando novas fronteiras que extrapolam o projeto de processos, tais como sua aplicação para otimização em tempo real, predição de propriedades *on-line* e interação com ferramentas de suporte à tomada de decisões.

2.2 HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

O primeiro marco desta tecnologia surgiu na década de 50, conforme pode ser visto na Figura 1, quando os primeiros desenvolvimentos com seus escopos bastante limitados e restritos a modelagem de equipamentos mais simples, os quais eram simulados individualmente.

Figura 1 - Histórico de simulação de processos.



Fonte: Nicodemos (2011).

Coube, na época, às empresas integradas, como a *DuPont*, o desenvolvimento das aplicações iniciais de CAPE, como foi o caso do CPES (*Chemical Process Evolution System*) escrito em linguagem FORTRAN. Este sistema e outros, como o FlowTran (Monsanto), eram executados em computadores de grande porte (*mainframe*) como os IBM 1620, 7090 e 7094.1. Dez anos depois, com o melhoramento dos programas e desenvolvimento de novos equipamentos, uma nova discussão acadêmica foi iniciada, a qual falava sobre o desenvolvimento de um aplicativo flexível de simulação, chegando-se, então, aos primeiros simuladores modulares de estado estacionário que podiam ser executados de forma robusta, tal como o GPSS (*General Purpose Simulation System*) que foi desenvolvido inicialmente pela IBM.

Nos testes iniciais ocorreram muitos fracassos no desenvolvimento, sendo que em 1963 saiu a primeira versão do SIMSCRIPT em Fortran e em 1968, os Drs. Rudy Motard e Ernest Henley concluíram na Universidade de Houston o desenvolvimento da primeira versão do CHESS (*Chemical Engineering Simulation System*), a partir de um financiamento da Marinha norte-americana. Neste mesmo período o Departamento de Energia dos EUA financiava o desenvolvimento de outro simulador de processos no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), o qual originou nos anos seguintes dois produtos comerciais de simulação, um dos quais com o código incorporado do FlowTran. Aos poucos empresas especializadas em simulação tomaram o lugar da indústria na dianteira do desenvolvimento.

De 1970 a 1980 aumentou-se a aceitação da tecnologia e os clientes passaram a exigir os testes de simulação de plantas químicas adquiridas por eles durante o projeto. Métodos numéricos foram melhorados, além de surgirem outros, e avançou-se também na parte de modelagem termodinâmica.

A partir de 1983, o simulador CHESS (renomeado para *MicroCHESS*), tornou-se um dos primeiros simuladores que eram executados em um PC (*Personal Computer*), sendo seguido por outros neste mesmo período. Além dos algoritmos computacionais que foram melhorados, as interfaces gráficas das máquinas também ficaram mais sofisticadas.

A partir de 1990 iniciou-se o grande impulso para a integração dos aplicativos de CAPE com outras ferramentas computacionais como: planilhas de cálculo, programas de desenho de engenharia e editores de texto.

O padrão tecnológico em desenvolvimento, o GCO (*Global CAPE-OPEN*), permitiu a integração de simuladores de diferentes fabricantes e o cálculo de propriedades físico-químicas de substâncias puras e misturas a partir da estrutura tridimensional das moléculas via mecânica estatística.

2.3 IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

A seguir são listadas algumas vantagens de se empregar um processo de simulação numérica:

- Uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas.
- A metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam ainda, na forma de “esquemas” ou “rascunhos”.

- A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos, pois estes requerem um número muito grande de simplificações para torná-los matematicamente tratáveis, sendo que os modelos de simulação não apresentam tais restrições. Além disso, nos modelos analíticos, as análises recaem apenas sobre um número limitado de medidas de desempenho. De maneira contrária, os dados gerados pelos modelos de simulação, permitem a análise de praticamente qualquer medida concebível.
- Uma vez que os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto o sistema real, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação, entre outros, podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado.
- Hipóteses sobre como ou por que certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação.
- O tempo pode ser controlado, pode ser comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira lenta ou acelerada, para que se possa melhor estudá-los.
- É possível compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema.
- A identificação de “gargalos”, preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, fluxo de informações e de produtos, pode ser obtida de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual.
- Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera.
- Novas situações, sobre as quais se tem poucos conhecimentos e experiência, podem ser tratadas, de tal forma que se tenha, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: “O que aconteceria se?”.

Por outro lado, existem alguns requisitos e/ou cuidados a serem tomados para se empregar a simulação:

- A construção de modelos requer treinamento especial, envolve arte, portanto o aprendizado se dá ao longo do tempo com a aquisição de experiência. Dois modelos de um sistema construídos por dois indivíduos competentes podem ser similaridades, mas dificilmente serão iguais.

- Os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação, uma vez que os modelos tentam capturar a aleatoriedade do sistema. Existem dificuldades em determinar quando uma observação é realizada durante uma execução se o resultado se deve a alguma significativa relação no sistema ou a alguma aleatoriedade construída no modelo.
- A modelagem e a experimentação, associadas a modelos de simulação, consomem muitos recursos, principalmente tempo. A tentativa de simplificação na modelagem ou nos experimentos, objetivando economia de recursos, costuma levar a resultados insatisfatórios. Um bom modelo deve ter compatibilidade, estabilidade e convergência.

2.4 ARQUITETURA BÁSICA E TIPOS DE SIMULADORES DE PROCESSOS

Os simuladores de processos são programas computacionais que oferecem aos usuários, um ambiente adequado para a modelagem de processos e sistemas térmicos, tornando essa modelagem uma tarefa rápida e fácil e propiciando economia de tempo e dinheiro. Concluída a modelagem, é possível efetuar a simulação do sistema ou processo, que fornece o balanço de massa, energia e exergia, bem como valores para as variáveis específicas incluídas nos modelos usados.

Os tipos de simuladores podem ser classificados através de alguns parâmetros, conforme Stoecker (1989) e Jaluria (1998), como:

- a) **Sistema contínuo ou discreto:** O modelo contínuo está relacionado com o fluxo constante de material como, por exemplo, o fluxo de gases quentes e energia térmica. Já o modelo discreto, foca em itens individuais tratados como um número certo de inteiros como, por exemplo, a análise do fluxo de pessoas em um supermercado.
- b) **Análise determinística ou estocástica (probabilística):** Nos modelos determinísticos, as variáveis de entrada são precisamente especificadas. Portanto, estes modelos predizem o comportamento do sistema com certeza enquanto que os modelos estocásticos (probabilísticos), normalmente, utilizam distribuições de probabilidade para determinar as variáveis de entrada, portanto, através destes modelos, estudam-se as influências probabilísticas que cercam um determinado sistema.
- c) **Sistema em regime permanente ou em regime transiente:** Se as propriedades e os parâmetros de operação não variam com o tempo, o sistema é dito estar em regime permanente, mas se a dependência do tempo é incluída, o sistema é dito estar em regime transiente.

Conforme já dito, os simuladores de processo sofreram uma evolução ao longo do tempo. No início, era comum o desenvolvimento de modelagens específicas, às vezes muito detalhadas e precisas, considerando o sistema térmico como um todo, mas, atualmente, o que parece uma tendência clara é a utilização de uma estrutura modular. Assim, foram desenvolvidos modelos para descrever o fenômeno físico e, às vezes, o comportamento econômico para os equipamentos e processos.

A partir do desenvolvimento de ferramentas para a simulação, projeto e otimização de sistemas ou processos mais flexíveis, surgiram os simuladores de processo com estrutura modular, passíveis de serem aplicados a diferentes sistemas.

Donatelli (2002) define três tipos de abordagens que podem ser claramente utilizadas na construção destas ferramentas, isto é, modular sequencial, modular orientada a projeto e modular orientada a equações, as quais serão descritas a seguir:

- a) **Simulador Modular Sequencial:** Nesta abordagem a estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação. Várias suposições são feitas para a obtenção da solução do problema, dentre elas:
 - As variáveis associadas aos componentes, isto é, as variáveis de projeto, devem sempre ser definidas e não devem ser tratadas como incógnitas. A mesma suposição é feita para variáveis associadas com os fluxos que entram no processo.
 - O fluxo de informações no modelo matemático deve coincidir com os fluxos físicos da planta. Essa suposição possibilita agrupar as variáveis em sub-vetores associados com o fluxo físico e selecionar para cada função uma variável associada com o fluxo de saída deixando o componente. Essa abordagem é apropriada para a simulação de sistemas e processos. Entretanto, as suposições feitas tornam o seu uso inadequado para o projeto e otimização de sistemas e processos.
- b) **Simulador modular orientado a projeto:** A estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação e variáveis de projeto não especificadas. Através desta estrutura orientada a projeto, é possível, com limitações, aplicá-la ao projeto e otimização de sistemas térmicos.
- c) **Simulador modular orientado a equações:** Nesta abordagem, apesar da sistemática de solução não ser modular, que é o critério de classificação usado por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), se considera a estrutura como sendo modular, visto que cada componente usado na configuração do sistema é modelado separadamente. No entanto, a modelagem do sistema térmico como um todo, realizada através da seleção e interligação adequada dos componentes (módulos), produz um grande sistema de

equações algébricas não lineares. Na solução desse sistema de equações as iterações são feitas simultaneamente sobre todas as incógnitas. Desta forma, tem-se total liberdade na definição das incógnitas, o que torna essa abordagem mais apropriada para projeto e otimização de sistemas térmicos.

2.5 EXEMPLOS DE PROGRAMAS PARA SIMULAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA

Os sistemas de energia muitas vezes são compostos por ciclos interligados que possuem um grande número de componentes simples, tais como válvulas, trocadores de calor, bombas, compressores, turbinas, desaeradores, dentre outros e, também, por dispositivos mais complexos, como gaseificadores e células de combustível, por exemplo. Estes equipamentos são ligados uns aos outros diretamente através de canalizações e condutos, resultando em uma rede complexa de fluxos de massa e energia. O número e o tipo de componentes e subsistemas, bem como a maneira pela qual eles estão ligados, podem variar em cada caso.

Existe no mercado uma vasta gama de simuladores para diferentes aplicações, sendo os mesmos utilizados tanto no meio acadêmico como comercialmente. Na Tabela 1 são relacionados alguns desses programas, bem como algumas de suas aplicações, tipo de regime e características principais.

Tabela 1 - Programas computacionais para simulação termodinâmica.

Programa	Regime	Aplicações Principais	Características
GateCycle (General Electric)	Regime permanente	Projeto de plantas de geração de potência, tanto a vapor quanto a gás; Projeto de plantas de ciclo combinado; Projeto de sistemas de cogeração; Projeto de “ <i>Retrofitting</i> ”.	Possui uma extensa biblioteca de equipamentos para projeto de plantas de potência, mas também permite o projeto de outros componentes para um dado equipamento; Possui interface com o MSExcel; Preço do programa é alto.
Aspen Plus (ASPENTECH)	Regime permanente	Simulação, projeto, análise de desempenho, otimização e planejamento econômico de indústrias químicas, petroquímicas e indústrias de materiais.	Possui estrutura “modular” orientada a equações; Possui enorme banco de dados de componentes puros e dados de equilíbrio de fase para produtos químicos; Permite simular projetos grandes e complexos; Une projetos de Design e Custo com simulação de processos.
IPSEpro (SIMTECH)	Regime permanente	Suprimento de energia (plantas convencionais e combinadas de geração de potência); Modelagem de equipamentos (turbina a gás, turbina a vapor); Outros processos industriais (processo de refrigeração, processo de destilação); Energia alternativa (produção energia solar, processamento de biomassa).	Possui uma extensa biblioteca de equipamentos para projeto de uma planta de potência; Possui interface com o MSExcel; Permite a criação de seus próprios componentes através do MDK; Possui um módulo de simulação de sistemas PSE.
Cycle-Tempo (TU Delft)	Regime permanente	Projeto de plantas de geração de potência tanto a vapor quanto a gás; Projeto de plantas de ciclo combinado; Projeto de sistemas de cogeração; Projeto de “ <i>Retrofitting</i> ”.	Possui uma extensa biblioteca de equipamentos para projeto de uma planta de potência. Muitos parâmetros a serem configurados, tornando a operação do programa complicada.
EES Engineering Equation Solver (F-Chart)	Regime permanente	Problemas de engenharia; Modelos de plantas de geração e cogeração de energia. Resolução de equações.	Possui uma tela gráfica onde pode ser visualizada a saída de dados configurada pelo usuário; Permite a entrada de equações pelo próprio usuário; Não possui uma biblioteca de aparatos pré-definida.

Fonte: Elaboração do autor.

3 MODELAGEM TERMODINÂMICA

O objetivo desta seção é estabelecer e revisar elementos e ideias que são utilizados na formulação termodinâmica, podendo, assim, analisar os parâmetros necessários.

Para a análise termodinâmica de sistemas são aplicadas as equações de conservação da massa, conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica), balanço de entropia (Segunda Lei da Termodinâmica) e o balanço de exergia baseado nas duas leis anteriores, considerando um volume de controle (V.C.) para cada um dos equipamentos que compõem a planta a ser analisada.

3.1 ANÁLISE ENERGÉTICA

3.1.1 Análise pela primeira Lei da Termodinâmica

A análise de sistemas e de processos pela primeira Lei da Termodinâmica está baseada nas conservações de massa e de energia. No caso de regime permanente, a conservação de massa inclui somente a análise do fluxo de massa que está entrando e saindo do volume de controle e desconsidera a variação de massa no interior do volume de controle. Além disso, considerando-se que as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis no balanço de energia.

Assim, as equações para o volume do controle em regime permanente, de uma forma geral, podem ser expressas por (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995):

$$\sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{v.c} - \dot{W}_{v.c} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

sendo:

$\dot{m}_e$ - Fluxo de massa entrando no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_s$ - Fluxo de massa saindo do volume de controle (kg/s);

h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{Q}_{v.c}$ - Fluxo de calor no volume de controle (kW);

$\dot{W}_{v.c}$ - Fluxo de trabalho no volume de controle (kW).

A Equação (1) indica que a vazão mássica entrando no volume do controle é igual à vazão mássica que sai do volume do controle.

A Equação (2) estabelece que a taxa total da energia entrando no volume de controle é igual à taxa total de energia deixando o volume de controle, já desconsiderando as variações de energia cinética e potencial.

3.1.2 Análise pela segunda Lei da Termodinâmica

A segunda Lei da Termodinâmica determina se o processo de conversão de energia será possível ou não, ou seja, permite uma análise qualitativa da energia e, também, a determinação da máxima eficiência de um processo de conversão de energia. Além disso, ainda conduz a outra propriedade chamada entropia, a qual quantifica a parcela de energia que não pode ser transformada em trabalho. A entropia pode ser usada para prever se um processo qualquer que envolve interações de energia pode ocorrer ou, ainda, se os sentidos dos processos de transferência do calor são possíveis. Também se pode dizer que a Segunda Lei da Termodinâmica governa os limites de conversão entre diferentes formas de energia. Para processos em volume de controle, o balanço de entropia é definido como (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995):

$$\dot{S}_{ger} = \frac{dS}{dt} - \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} - \sum_{ent} \dot{m}s + \sum_{sai} \dot{m}s \geq 0 \quad (3)$$

sendo:

$\dot{S}_{ger}$ - Taxa de entropia gerada no volume de controle (kW/K);

$\frac{dS}{dt}$ - Taxa de variação de entropia (kW/K);

$\sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i}$ - Taxa de entropia gerada pelos fluxos de calor (kW/K);

$\sum \dot{m}_s$ - Taxas de entropia que entram e saem com os fluxos de massa no volume de controle (kW/K).

A equação de balanço de entropia pode ser utilizada para prever se um processo qualquer que envolve interações de energia pode ocorrer ou, ainda, se os sentidos dos processos de transferência do calor são possíveis.

3.2 ANÁLISE EXERGÉTICA

A análise energética (primeira lei da termodinâmica) não contabiliza a qualidade da energia que está se perdendo e nem onde ocorrem as irreversibilidades dos processos, ou seja, não identifica onde e porque elas aparecem. Através de sua aplicação conjunta com a análise exergética pode-se analisar melhor os sistemas térmicos, complementando as informações e permitindo o cálculo tanto do valor termodinâmico de um fluxo, em termos do trabalho mecânico que poderia ser extraído dele, como das ineficiências e perdas termodinâmicas reais dos processos dos sistemas.

Em uma análise exergética é possível obter uma melhor medida para a avaliação da magnitude da energia perdida em relação à energia total suprida sob a forma de insumo energético. Também é possível uma medida da qualidade (ou do desperdício) da energia do ponto de vista termodinâmico e a definição da eficiência racional para o sistema energético.

Quando se deseja calcular o valor da exergia de um sistema, um fator importante a ser considerado é o ambiente de referência. Kotas (1985) afirma que o ambiente real é muito complexo para ser usado em cálculos termodinâmicos, sendo necessária a introdução de um meio ambiente idealizado. Neste caso, não existem gradientes de pressão, temperatura, potencial químico, energia cinética e potencial, não existindo a possibilidade de execução de trabalho por interação entre as várias partes. O ambiente pode ser modelado por duas abordagens:

- As substâncias que formam o meio ambiente de referência são escolhidas coincidindo com as substâncias do sistema analisado;
- Todos os sistemas são analisados adotando-se um único ambiente de referência, podendo coincidir ou não com o ambiente real.

Szargut, Morris e Steward (1988) estabeleceram uma substância padrão para cada um dos elementos da tabela periódica, desta forma definiram um ambiente padrão com o qual é possível calcular a exergia de qualquer composto químico. Além disso, eles calcularam a exergia de muitos compostos químicos e apresentaram os resultados na forma de tabelas.

Como a exergia é função das propriedades do sistema em dois estados, uma vez fixado o ambiente de referência, pode-se calcular a exergia para qualquer outro estado. Por exemplo, a variação de exergia entre dois estados será independente do processo seguido para alcançar um desses estados a partir do outro. Isto permite, por sua vez, definir uma trajetória composta por vários processos de forma a separar a variação total de exergia no somatório de vários

termos. Szargut, Morris e Steward (1988), Kotas (1985) e outros propõem a seguinte relação para o cálculo da exergia específica total:

$$e_t = e_f + e_q \quad (4)$$

onde:

e_f - Exergia física específica;

e_q - Exergia química específica.

A exergia física específica de um fluxo é calculada com base num estado de equilíbrio restrito com ambiente (P_0, T_0), através da seguinte equação:

$$e_f = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (5)$$

Para haver equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível, que leva o sistema do estado de equilíbrio restrito até o estado onde há equilíbrio completo (“estado morto”) é a exergia química específica, definida por:

$$e_q = \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (6)$$

onde:

$\mu_{0,i}$ - Potencial químico da substância no ambiente de referência i (kJ/kmol);

μ_i - Potencial químico da substância i no estado inativo restrito (kJ/kmol);

x_i - Fração molar do componente i na mistura.

Logo, a exergia específica total pode ser representada por:

$$e_i = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (7)$$

Para o cálculo da exergia específica do gás natural (ex_{gn}) utiliza-se a Equação (4). A parte correspondente à exergia química é calculada pela Equação (8), apresentada por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), que leva em conta o fato que quando gás natural está no estado inativo restrito e que os seus componentes estão a pressões parciais diferentes da pressão do ambiente, conforme segue:

$$e_{q_{gn}} = \sum_{i=n} x_i \varepsilon_i^0 + \bar{R} T_0 \sum_{i=n} x_i \ln x_i \quad (8)$$

sendo:

$e_{q_{gn}}$ - Exergia química do gás natural;

x_i - Fração molar de cada componente do combustível;

ε_i^0 - Exergia química *standard* de cada componente do combustível (kJ/kmol).

3.3 IRREVERSIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Um importante parâmetro a ser observado na análise exergética é a irreversibilidade em cada equipamento e, conseqüentemente, em todo o sistema. As irreversibilidades são determinadas através da aplicação do balanço de exergia, mostrando a quantidade de exergia que é destruída em cada equipamento do ciclo, ou seja, o quanto o equipamento é eficiente em aproveitar a exergia que nele é introduzida.

A análise exergética também contempla a determinação da quantidade com que cada equipamento contribui na geração de irreversibilidade global do sistema, podendo ser definida uma equação que permite quantificar a porcentagem da irreversibilidade de cada equipamento em relação ao total da planta (δ_i):

$$\delta_i = \frac{\dot{I}_i}{\sum_{i=1}^n \dot{I}_i} \quad (9)$$

onde:

$\dot{I}_i$ - Irreversibilidade num determinado equipamento;

$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i$ - Irreversibilidade total da planta.

3.4 MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS DE UM CICLO TÉRMICO E DE POTÊNCIA

3.4.1 Modelagem dos equipamentos de um ciclo a gás

Os componentes modelados para o ciclo a gás, em que o fluido de trabalho é composto por uma mistura de gases, tem como base o ciclo fundamental de potência de Brayton. Os equipamentos deste ciclo são: compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico.

a) Turbina

Neste componente, os gases realizam a expansão de acordo com a sua eficiência isentrópica (η_{iso}). O procedimento de cálculo é análogo ao do compressor, com o detalhe adicional que a expansão é efetuada da pressão de entrada da turbina a pressão de saída, a qual deve ser suficiente para vencer as perdas de carga especificadas nos equipamentos da caldeira de recuperação. Assim, tem-se:

$$\eta_{exp_{iso}} = \frac{(h_e - h_s)}{(h_e - h_{s_{iso}})} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_{gases}(h_e - h_s) \quad (11)$$

A potência mecânica gerada pela turbina a gás é dada pela potência gerada na expansão dos gases, descontando-se a potência utilizada pelo compressor de ar, assim:

$$\dot{W}_{TG} = \dot{W}_{exp} - \dot{W}_c \quad (12)$$

A eficiência pela segunda Lei da Termodinâmica (ψ_{exp}) e a geração de irreversibilidades no processo de expansão dos gases de exaustão ($\dot{I}_{exp}$) são dadas, respectivamente, por:

$$\psi_{exp} = \frac{\dot{W}_{exp}}{\dot{m}_{gases}(e_s - e_e)} \quad (13)$$

$$\dot{I}_{exp} = \dot{m}_{gases}(e_s - e_e) - \dot{W}_{exp} \quad (14)$$

onde:

e_s - Exergia específica do ar que sai do compressor (kJ/kg);

e_e - Exergia específica do ar que entra no compressor (kJ/kg).

b) Câmara de combustão

A análise aplica-se a um volume de controle ao redor da câmara de combustão. Os fluidos de entrada constituem-se de ar, proveniente do compressor, e o combustível, que é injetado diretamente à mesma pressão da câmara.

No processo de combustão admite-se que são conhecidas as condições de entrada do ar e do gás natural, a temperatura dos gases que deixam a câmara e a eficiência de combustão.

Para a determinação da temperatura adiabática de chama, considerando a combustão completa do gás natural e a câmara como sendo adiabática, é utilizada a seguinte equação:

$$\sum (\dot{n}_i \bar{h}_i)_{reagentes} = \sum_j (\dot{n}_j \bar{h}_j)_{produtos} \quad (15)$$

sendo:

$\bar{h}$ - Entalpia molar, incluindo a entalpia de formação (kJ/kmol).;

$\dot{n}$ - Número de moles do componente químico (kmol/s).

Após a determinação da temperatura adiabática da chama é calculado o excesso de ar necessário para se atingir a temperatura dos gases na entrada das turbinas, a qual é fornecida como uma característica de projeto da turbina a gás.

Numa câmara de combustão real, a combustão é incompleta e ocorre transferência de calor para o meio, portanto é necessário mais combustível para que se atinja a temperatura desejada, essa relação é chamada de relação combustível/ar real (f_{real}). Assim, pode-se adotar um parâmetro de eficiência que defina essas perdas. A eficiência da combustão (η_{comb}) é definida pela razão entre a relação combustível/ar teórica (f_{teor}) e a relação combustível/ar real (f_{real}), para a mesma elevação de temperatura dos gases entre a entrada e a saída da câmara de combustão, como segue (COHEN *et al.*, 1996):

$$\eta_{comb} = \frac{f_{teor}}{f_{real}} \quad (16)$$

A partir da relação combustível/ar teórico (f_{teor}), da eficiência de combustão (η_{comb}) e com a Equação (16), se tem a relação real ar/combustível (f_{real}) e, dessa forma, calcula-se o fluxo de massa de ar necessário para que se atinja a temperatura de saída da câmara, sendo possível estabelecer a composição dos gases de exaustão e, assim, calcular suas propriedades termodinâmicas.

A entalpia dos produtos de combustão é calculada através da fração mássica de seus componentes e da pressão e temperatura em que eles se encontram como segue:

$$h_{gases}(T, P) = \sum n_i h_i(T, P) \quad (17)$$

onde:

$h_{gases}(T, P)$ - Entalpia específica dos gases de combustão a T e P (kJ/kg);

$h_i(T, P)$ - Entalpia específica do componente i nos gases de combustão (kJ/kg).

A conservação da massa na câmara é dada por:

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{gn} \quad (18)$$

A perda de carga na câmara de combustão, Cohen et al. (1996), indicaram para turbinas aeroderivativas que este valor situa-se na faixa de 4 a 7% devido às restrições construtivas de volume da turbina. No caso de turbinas a gás industriais, a perda de carga é da ordem de 2% da pressão de entrada.

A eficiência pela segunda lei (ψ_{cc}) e a geração de irreversibilidades ($\dot{I}_{cc}$) no processo de combustão são dadas, respectivamente, por:

$$\psi_{cc} = \frac{\dot{m}_{gases} e_{sgases}}{\dot{m}_{ar} e_{ear} + \dot{m}_{gn} e_{egn}} \quad (19)$$

$$\dot{I}_{cc} = \dot{m}_{ar} e_{ear} + \dot{m}_{gn} e_{egn} - \dot{m}_{gases} e_{sgases} \quad (20)$$

onde:

e_{sgases} - Exergia específica dos gases que saem da câmara de combustão (kJ/kg);

e_{ear} - Exergia específica do ar que entra na câmara de combustão (kJ/kg);

e_{egn} - Exergia específica do gás natural que entra da câmara de combustão (kJ/kg).

c) Gerador elétrico

A turbina a gás está ligada diretamente ao gerador elétrico. Um valor de eficiência elétrica (η_g) é adotado para se considerarem as perdas da ligação com o gerador que podem ser efetuadas através de um conjunto de engrenagens para redução de rotação. Assim, a potência elétrica da turbina é dada por:

$$\dot{W}_{TGele} = \eta_g \dot{W}_{TGele} \quad (21)$$

d) Compressor

Os parâmetros que definem o compressor utilizado são a razão de compressão (β) e a eficiência isentrópica do processo de compressão ($\eta_{c_{iso}}$), definidas, respectivamente, por:

$$\beta = \frac{P_s}{P_e} \quad (22)$$

$$\eta_{c_{iso}} = \frac{(h_{s_{iso}} - h_e)}{(h_s - h_e)} \quad (23)$$

onde:

- h_e - Entalpia específica de entrada no compressor (kJ/kg);
- h_s - Entalpia específica de saída do compressor (kJ/kg);
- $h_{s_{iso}}$ - Entalpia específica de saída isentrópica em função de P_s e s_e (kJ/kg);
- P_s - Pressão de saída do compressor (kPa);
- P_e - Pressão de entrada no compressor (kPa).

A pressão de saída no compressor é determinada diretamente pela razão de compressão. A partir de uma dada razão de compressão e da eficiência isentrópica, pode-se determinar a entalpia isentrópica do ar na saída do compressor, desde que seja conhecida a pressão de saída e imposta a condição de igualdade de entropias entre a entrada e a saída do equipamento. Obtida a entalpia isentrópica de compressão, e a partir da definição da eficiência isentrópica, chega-se à entalpia real do ar na saída do compressor, através da qual é possível determinar a temperatura real de saída no compressor.

A potência de compressão ($\dot{W}_c$) é dada por:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_{ar}(h_s - h_e) \quad (24)$$

com:

$\dot{m}_{ar}$ - Fluxo mássico de ar no compressor (kg/s).

A eficiência pela segunda lei (ψ_c) e a geração de irreversibilidades ($\dot{I}_c$) no processo de compressão são dadas, respectivamente, por:

$$\psi_c = \frac{\dot{m}_{ar}(e_s - e_e)}{\dot{W}_c} \quad (25)$$

$$\dot{I}_c = \dot{W}_c - \dot{m}_{ar}(e_s - e_e) \quad (26)$$

onde:

- e_s - Exergia específica do ar que sai do compressor (kJ/kg);
- e_e - Exergia específica do ar que entra no compressor (kJ/kg).

3.4.2 Modelagem dos componentes do ciclo a vapor

Os componentes modelados no ciclo em que o fluido de trabalho é o vapor, que tem como base o ciclo fundamental de potência de Rankine, são: caldeira de recuperação, desaerador, turbina a vapor, condensador e bombas.

a) Bomba

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, a potência da bomba (N_B) é dada por:

$$N_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B} \quad (27)$$

onde:

- N_B - Potência da bomba
- H_B - Carga manométrica da bomba.
- η_B - Rendimento da bomba.

Em relação à segunda Lei da termodinâmica, a eficiência da bomba (ψ_b) é dada por:

$$\psi_b = \frac{e_x}{PCI} \quad (28)$$

b) Caldeira de recuperação

A modelagem da caldeira de recuperação é realizada em vários volumes de controle, envolvendo cada um de seus equipamentos, de forma que o estado calculado na saída de um equipamento seja o estado de entrada para o próximo equipamento.

Os evaporadores, economizadores e superaquecedores são modelados como trocadores de calor de contra corrente, sem mistura dos fluidos. O cálculo das propriedades da água na saída do equipamento é efetuado com base nos balanços de massa, energia e exergia, admitindo-se como conhecidos os estados da água e do vapor na entrada.

Conhecidos os estados dos fluidos na entrada e os fluxos mássicos dos fluidos, a temperatura de saída dos fluidos é calculada pelo balanço de energia aplicado ao trocador de calor. Considerando-se um coeficiente (η_{TC}) devido às perdas de calor para o meio, o balanço de energia no economizador, no evaporador e no superaquecedor da caldeira de recuperação é dado da seguinte maneira:

$$\dot{m}_{agua} (h_{s_{agua}} - h_{e_{agua}}) = \eta_{TC} \dot{m}_{gases} (h_{e_{gases}} - h_{s_{gases}}) \quad (29)$$

com:

h - Entalpia específica do fluido (kJ/kg);

m - Fluxo mássico (kg/s).

O *pinch point* e o *approach* são introduzidos no equacionamento da caldeira de recuperação nos evaporadores, através da temperatura de saturação do vapor em uma dada pressão, assim:

$$T_{evapor} = T_{svapor} - T_{ap} \quad (30)$$

$$T_{sgases} = T_{pp} + T_{svapor} \quad (31)$$

onde:

T_{ap} - *Approach* (°C);

T_{pp} - *Pinch point* (°C).

A eficiência da segunda lei para cada trocador de calor (ψ_{TC}) e a taxa de irreversibilidade ($\dot{I}_{TC}$) são dadas, respectivamente por:

$$\psi_{TC} = \frac{\dot{m}_{agua}(e_{sagua} - e_{eagua})}{\dot{m}_{gases}(e_{sgases} - e_{egases})} \quad (32)$$

$$\dot{I}_{TC} = \dot{m}_{gases}(e_{sgases} - e_{egases}) - \dot{m}_{agua}(e_{sagua} - e_{eagua}) \quad (33)$$

onde:

e_s - Exergia específica do fluido que sai do compressor (kJ/kg);

e_e - Exergia específica do fluido que entra no compressor (kJ/kg).

A perda de carga dos fluidos ao passar pelo trocador de calor é dada por:

$$P_s = (1 - \phi)P_e \quad (34)$$

onde:

P_e - Pressão de entrada do trocador de calor (kPa);

P - Pressão de saída do trocador de calor (kPa);

ϕ - Perda de pressão no trocador de calor (%).

Dois fatores devem ser considerados quando se selecionam os níveis de pressão em caldeiras de recuperação são as pressões de vapor de alta e de baixa. A pressão do vapor de alta deve ser suficiente para atingir um bom aproveitamento dos gases e a pressão do vapor de baixa deve ser a mais baixa possível diminuindo, assim, a temperatura dos gases de escape e recuperando a máxima quantidade de calor dos mesmos. Segundo Kehlhofer *et al.* (1999), a menor pressão de baixa aceitável está em torno de 3 bar, pois abaixo deste valor a queda de entalpia disponível na turbina de baixa torna-se muito pequena e a vazão de vapor torna-se muito grande, aumentando os custos dos equipamentos.

Outra questão a ser observada é a variação do título do vapor em função do aumento da pressão do vapor de alta na turbina a vapor de condensação. Da mesma maneira que no caso de um único nível de pressão, o aumento da pressão de alta diminui o título na saída da turbina, devendo este aumento de pressão ser monitorado de modo a não ultrapassar o limite mínimo do título especificado para a turbina. Recomenda-se que o título da mistura líquido vapor seja superior a 87 % (NARULA, 1995).

A eficiência para caldeiras de recuperação é calculada, segundo a relação proposta por (LISZKA; MANFRIDA; ZIEBIK, 2003):

$$\eta_{CR} = \frac{Q_{CR}}{\dot{m}_{gases} h_{e_{gases}}} \quad (35)$$

onde:

Q_{CR} Calor transferido para a água pela caldeira de recuperação (kW).

$\dot{m}_{gases}$ Fluxo de gases de exaustão na caldeira de recuperação (kg/s).

$h_{e_{gases}}$ Entalpia específica de entrada dos gases de exaustão na caldeira (kJ/kg).

A eficiência exergética da caldeira de recuperação é calculada pela relação entre o fluxo de exergia fornecida pelos gases de exaustão, potência das bombas e pelos fluxos de exergia do vapor descontados do fluxo que entra de água na caldeira, resultando:

$$\psi_{CR} = \frac{\sum \dot{m}_{vapor} e_{vapor} - \dot{m}_{agua} e_{agua}}{\dot{m}_{gases} e_{gases} + \dot{W}_b} \quad (36)$$

c) Desaerador

Este equipamento consiste num trocador de calor de contato direto entre a água de alimentação proveniente do pré-aquecedor e o vapor que passa pelo evaporador de baixa. A

mistura destes fluidos resulta no aquecimento da água e liberação dos gases dissolvidos não condensáveis. O objetivo é proteger contra a corrosão os componentes à jusante, como tubos da caldeira de recuperação, bombas e turbinas.

O balanço de energia no desaerador é dado pela seguinte equação:

$$\sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (37)$$

A eficiência pela segunda lei para o desaerador (ψ_{DA}) e a geração de irreversibilidades ($\dot{I}_{DA}$) nas trocas térmicas são dadas, respectivamente, por:

$$\psi_{DA} = \frac{\sum \dot{m}_s e_s}{\sum \dot{m}_e e_e} \quad (38)$$

$$\dot{I}_{DA} = \sum \dot{m}_s e_s - \sum \dot{m}_e e_e \quad (39)$$

onde:

e_s - Exergia específica da água que sai do desaerador (kJ/kg);

e_e - Exergia específica da água que entra no desaerador (kJ/kg).

d) Turbina a vapor

Para o cálculo da potência produzida pela turbina a vapor e das condições de saída do vapor, considera-se o rendimento isentrópico (η_{TV}) para a turbina, de forma análoga ao da turbina a gás:

$$\eta_{TV} = \frac{(h_e - h_s)}{(h_e - h_{s_{iso}})} \quad (40)$$

A potência elétrica da turbina a vapor é dada através do rendimento do gerador (η_g), da mesma forma ao da turbina a gás:

$$\dot{W}_{TV_{ele}} = \eta_g \dot{W}_{TV} \quad (41)$$

A eficiência pela segunda lei (ψ_{TV}) e a taxa de irreversibilidade ($\dot{I}_{TV}$) no processo de expansão do vapor superaquecido são dadas, respectivamente, por:

$$\psi_{TV} = \frac{\dot{W}_{TV}}{\dot{m}_{vapor}(e_s - e_e)} \quad (42)$$

$$\dot{I}_{TV} = \dot{m}_{vapor}(e_s - e_e) - \dot{W}_{TV} \quad (43)$$

3.5 RENDIMENTO DE UM CICLO TÉRMICO E DE POTÊNCIA

O rendimento do ciclo da turbina a gás baseado na primeira lei ($\eta_{Brayton}$) é dado como a razão entre a potência útil produzida e o calor fornecido pela queima do combustível, e pode ser escrito da seguinte forma:

$$\eta_{Brayton} = \frac{\dot{W}_{TG}}{\dot{m}_{gases} PCI} \quad (44)$$

onde:

PCI - Poder calorífico inferior, dado pela entalpia dos produtos de combustão (kJ/kg).

O rendimento do ciclo da turbina a gás baseado na segunda lei ($\psi_{Brayton}$) é escrito como:

$$\psi_{Brayton} = \frac{\dot{W}_{TG}}{\dot{m}_{gn}e_{gn} + \dot{m}_{ar}e_{ar}} \quad (45)$$

O rendimento do ciclo da turbina a vapor ($\eta_{Rankine}$) pode ser obtido considerando a potência produzida nas turbinas a vapor e consumida nas bombas e o calor fornecido pelos gases de exaustão, da seguinte forma:

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{W}_{TV} - \dot{W}_b}{\dot{Q}_{CR}} \quad (46)$$

De forma análoga, pode-se escrever o rendimento exergético para o ciclo a vapor ($\psi_{Rankine}$), considerando a variação da exergia do fluxo de gases de exaustão que passa pela caldeira de recuperação, assim:

$$\psi_{Rankine} = \frac{\dot{W}_{TV} - \dot{W}_b}{\dot{m}_{gases}(e_{egases} - e_{sgases})} \quad (47)$$

O rendimento total de um ciclo combinado ($\eta_{Combinado}$) de um sistema de pode ser escrito como a razão entre a potência útil produzida e o calor fornecido pela queima do combustível, da seguinte forma:

$$\eta_{Combinado} = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV} + \dot{W}_b}{\dot{m}_{gases} PCI} \quad (48)$$

onde:

$\dot{W}_{TV}$ - Potência produzida nas turbinas a vapor (kW);

$\dot{W}_{TG}$ - Potência produzida nas turbinas a gás (kW);

$\dot{W}_b$ - Potência utilizada nas bombas (kW);

$\dot{m}_{gases}$ - Fluxo dos gases de exaustão das turbinas a gás (kg/s).

O rendimento exergético do ciclo combinado ($\psi_{Combinado}$) é análogo ao rendimento total, porém considerando a exergia fornecida pelo gás natural, assim:

$$\psi_{Combinado} = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV} + \dot{W}_b}{\dot{m}_{gn} e_{gn} + \dot{m}_{ar} e_{ar}} \quad (49)$$

4 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS PROGRAMAS DISPONÍVEIS PARA SIMULAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA

Nesta seção serão mostradas as características de alguns programas disponíveis no mercado e/ou meio acadêmico para elaboração de cálculo de plantas térmicas, a saber: Cycle-Tempo, EES, IPSEpro, GateCycle, e Aspen Plus.

4.1 PROGRAMA CYCLE-TEMPO

O programa Cycle-Tempo foi desenvolvido pela TU Delft (*Delft University of Technology*) como uma ferramenta moderna para a análise termodinâmica e otimização dos sistemas energéticos. Sua história é bem antiga, tem mais de 30 anos, e seu desenvolvimento ainda continua na Seção de Tecnologia da Energia da TU Delft.

O Cycle-Tempo deixa totalmente à escolha do usuário a configuração do seu sistema, possui ambiente para a elaboração do esquema de processo e funciona em ambiente Windows. O ambiente de desenho apresentado por este programa facilita muito a elaboração do esquema de processo da instalação, além de possuir uma metodologia eficaz para a análise da instalação em condições fora de projeto. Possui uma biblioteca de componentes, os quais são conectados entre si pelas linhas relativas às mais variadas correntes de substâncias (combustível, ar, água, vapor, mistura de gases, etc...) em circulação em um sistema de conversão de energia.

O Cycle-Tempo permite ao usuário compor praticamente qualquer modelo de sistema desejado. Acima de tudo, além de modelos personalizados, também é possível criar novos modelos. Esta flexibilidade quase ilimitada é uma vantagem fundamental sobre uma série de programas existentes, em que pouca ou nenhuma variação da configuração do sistema é possível. Por outro lado, o Cycle-Tempo possui, para cada equipamento, vários parâmetros específicos a serem fornecidos no cálculo, dificultando um pouco a sua utilização, pois é necessário o conhecimento de cada um deles.

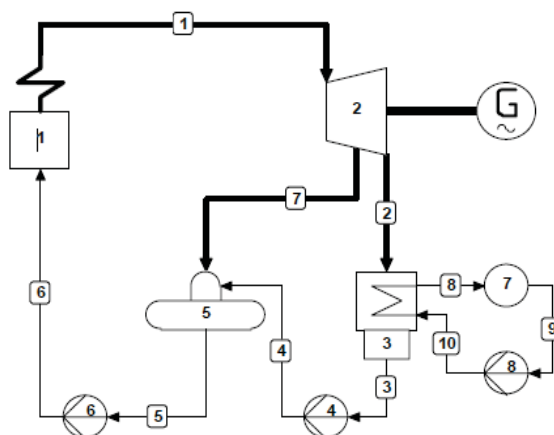
O Cycle-Tempo foi desenvolvido para calcular os fluxos de massa, as variáveis termodinâmicas, o equilíbrio químico e as composições dos fluxos mistos para os seguintes processos ou combinações de processos:

- Ciclos de turbinas a vapor;
- Ciclos de turbina a gás;

- Ciclos *topping* de potássio;
- Sistemas de célula de combustível;
- Sistemas de gaseificação de carvão;
- Sistemas de compressão de vapor, máquinas de refrigeração e bombas de calor;
- Sistemas com máquinas de refrigeração por absorção e bombas de calor.

O princípio do método de cálculo do Cycle-Tempo é explicado a partir do desenho da planta exemplo, apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo de planta exemplo, gerada no Cycle-Tempo.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Para o cálculo dos fluxos de massa do processo o sistema gera uma matriz conforme pode ser visto na Figura 3. Com o sistema de matriz os fluxos de massa são calculados simultaneamente através de equações, para balanço de massa da caldeira, turbina, desaerador, bomba de água e balanço energético na turbina.

Para cada ciclo fechado um balanço de massa deve ser eliminado pelo próprio programa, a fim de obter um conjunto independente de equações. A matriz do sistema é resolvida e os fluxos de massa do sistema são calculados. O programa utiliza o sistema operacional WINDOWS (98, XP, ou VISTA) e opera em microcomputadores com Processador PENTIUM II acima de 300 MHz, com no mínimo 256 MB de memória RAM e com uma resolução de vídeo recomendada de 1024 x 768.

Figura 3 - Matriz de deslocamento de massa gerada no Cycle-Tempo.

pipe numbers											
Component	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Boiler	1	-1					-1				
Turbine	2	1	-1					-1			
Condenser	3		1	-1					-1	1	
Condenser (cooling)	3								-1	1	
Deaerator	5				1	-1		1			
Feedpump	6					1	-1				
Coolwater pump	8									1	-1
Deaerator	5			h_4	$-h_6$			h_7			
Condenser	3		h_2	$-h_3$					$-h_8$	h_{10}	
Turbine	2	h_1	$-h_2$					$-h_7$			
											*
											m_1
											m_2
											m_3
											m_4
											m_5
											m_6
											m_7
											m_8
											m_9
											m_{10}
											$=$
											0
											0
											0
											0
											0
											P_{tur}

Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

4.2 PROGRAMA EES

O EES (*Engineering Equation Solver*) foi desenvolvido por Klein e Alvarado (1995), da empresa *F-Chart Software*. Este programa possui uma série de propriedades termofísicas (pressão, volume específico, entalpia, temperatura, título, entropia, dentre outras) para várias substâncias, além de uma série de funções matemáticas (Bessel, trigonométricas, lógicas, e para transformação de unidades, dentre outras), além de funções externas que podem ser incluídas no programa.

Uma combinação de capacidade de resolução de equações e dados de propriedades de engenharia torna o EES uma ferramenta extremamente poderosa. O EES permite resolver problemas, especialmente os problemas de projeto, e formular questões de tipo “o que acontece se”. O EES pode efetuar otimização, análise paramétrica, regressão linear e não-linear, e ainda fornece capacidade de plotagem com qualidade de publicação. O programa permite que as equações escritas de qualquer forma e em qualquer ordem. O programa reordena as equações e as resolve da maneira mais eficiente.

O EES é particularmente útil em problemas de mecânica dos fluidos, transferência de calor e termodinâmica, pois muitos dos dados de propriedades necessários na solução de problemas nessa área são fornecidos pelo programa, tais como tabelas de ar, vapor, funções psicrométricas e tabelas de dados da JANAF (*Joint Army Navy Air Force*) para muitos gases comuns. Propriedades de transporte também são fornecidas para todas as substâncias.

O EES permite que o usuário entre com dados de propriedades ou relações funcionais escritas em Pascal, C, C++ ou Fortran. A partir de um *website* protegido por senha, uma versão acadêmica do programa EES está disponível, bem como em alguns livros-textos com os quais existe uma associação com os autores.

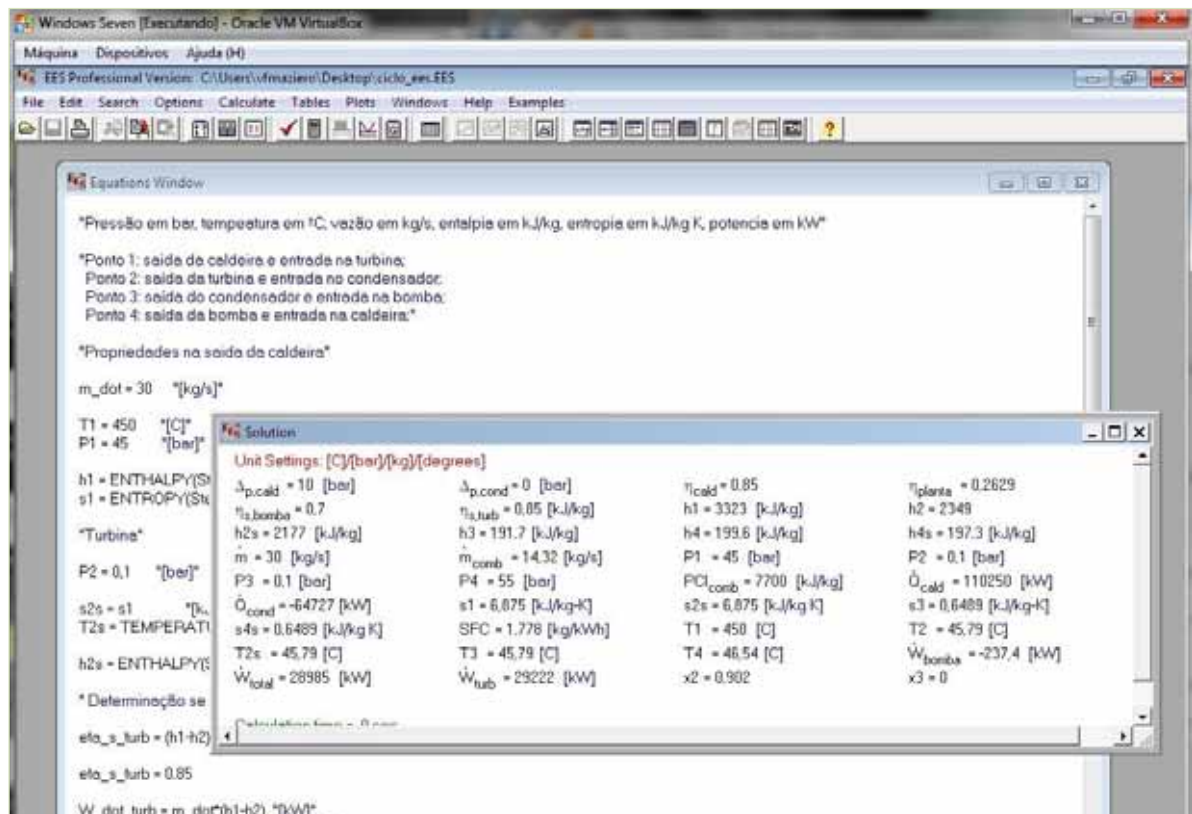
Entre as facilidades do EES podem ser destacadas as seguintes:

- Opera em todos os sistemas operacionais Microsoft Windows;
- Resolve até 6.000 equações lineares simultâneas na versão acadêmica e 12.000 na versão profissional;
- As equações podem ser inseridas em qualquer ordem com *built-editor*;
- Velocidade computacional extremamente rápida;
- Alta precisão e funções termodinâmicas de transporte para 100 tipos de fluidos;
- Unidade de conversão e verificação de consistência automática de unidade;
- Otimização de variáveis;
- Análise de incertezas e capacidade de regressão;
- Mecanismos de plotagem (2-D, contorno e 3-D), com atualização automática;
- Interface de saída para arquivos LaTeX e PDF e, também, para impressora;
- Entrada gráfica do usuário / capacidades de saída com Diagrama janela.

O EES possui um ambiente gráfico bem simples, contando apenas com algumas ferramentas para criação de círculos, quadrados e retas. Seu ambiente gráfico aceita a importação de imagens JPG ou BMP, feitas em outros aplicativos, as quais podem ser utilizadas para montagem de uma tela de fundo. No entanto, este ambiente não possui uma interação com o usuário, como encontrado em outros programas. O usuário pode definir algumas entradas e saídas de dados na tela gráfica, porém são informações fixas que serão apresentadas naquela posição da tela, sendo que as mesmas podem possuir um *link* para gráficos ou para cálculos a serem executados.

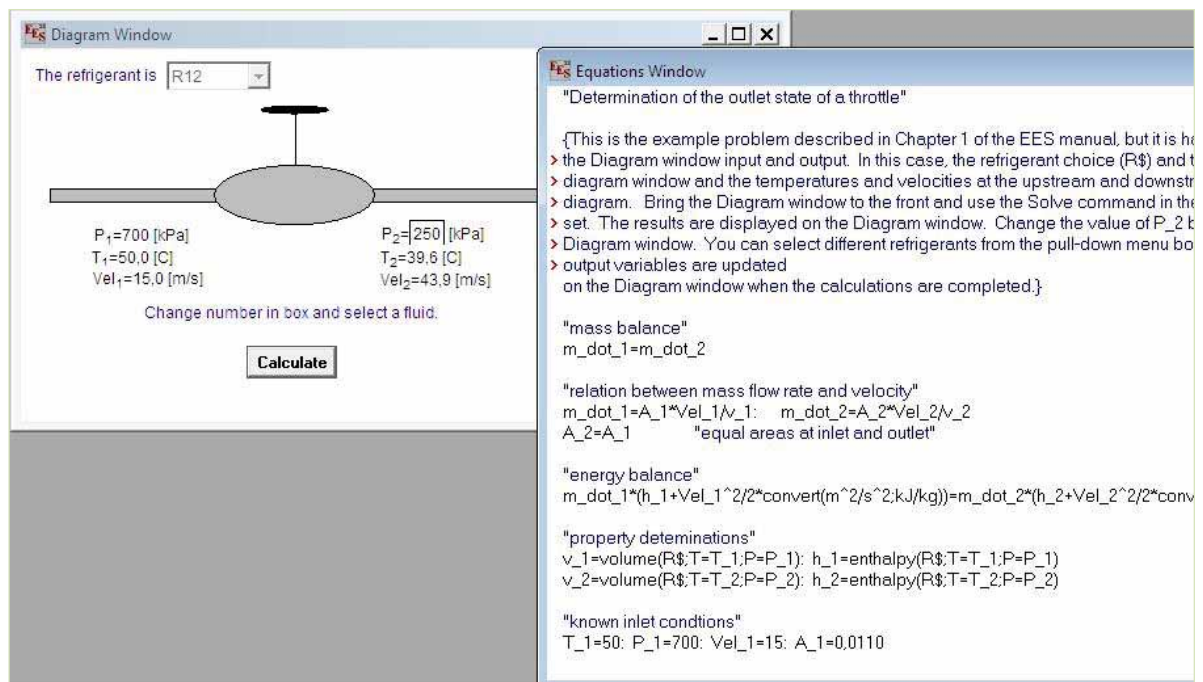
A Figura 4 mostra uma tela do programa EES para cálculo de um Ciclo de Rankine. Na Figura 5, pode ser vista uma tela gráfica criada no programa EES a qual permite que o usuário possa escolher o tipo de gás e a pressão de saída da válvula. O botão CALCULATE irá disparar o evento para o cálculo e os resultados são mostrados na própria tela. O desenho pode ser feito no EES ou em qualquer outro aplicativo gráfico.

Figura 4 - Tela do programa EES para cálculo de um Ciclo de Rankine.



Fonte: Elaboração do autor através do programa EES.

Figura 5 - Ambiente gráfico do programa EES.



Fonte: Elaboração do autor através do programa EES.

4.3 PROGRAMA IPSEPRO

O IPSEpro é um programa comercial, de nível industrial, flexível, rápido e detalhado, ideal para analisar processos na engenharia térmica, engenharia química e muitas outras áreas relacionadas, o qual vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado desde a década de 90 pela empresa austríaca *SimTech Simulation Technology*.

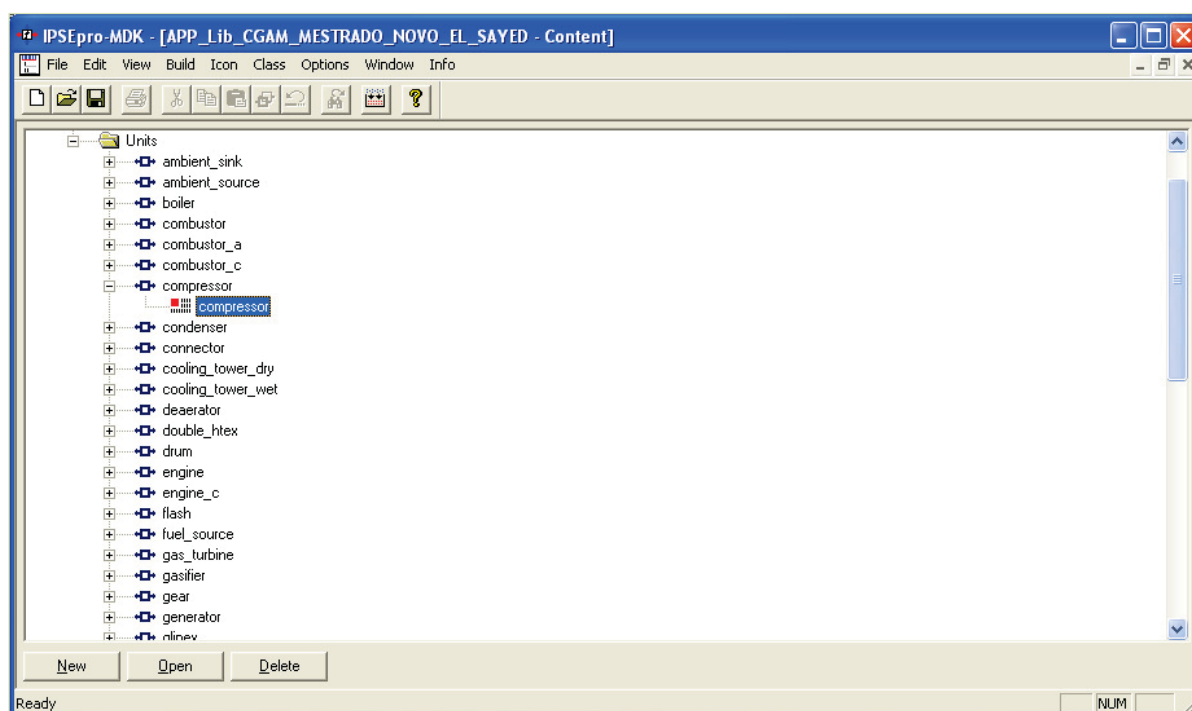
No início, o programa possuía apenas um código que realizava o balanço energético, mas atualmente o mesmo possui um ambiente de modelagem sofisticado, em aberto, que possibilita que o usuário adapte os modelos de componentes às suas necessidades. O IPSEpro possui ainda um código de otimização, sendo que as suas aplicações incluem: plantas de potência térmica convencionais, plantas de cogeração, plantas de ciclos combinados, energia solar, energia de biomassa, além de projeto de componentes.

O IPSEpro é um programa extremamente poderoso. A habilidade de criar seus próprios modelos de componentes permite que o usuário utilize o programa para muitos problemas que tinham que ser resolvidos com muito mais esforço antes. Esse simulador é constituído por dois módulos básicos principais: MDK (*Model Development Kit*), módulo de desenvolvimento de modelos de componentes, e o PSE (*Process Simulation Environment*), módulo de simulação de sistemas, no qual pode ser adicionado um módulo mais avançado de responsável pela otimização (PSEoptimize).

O MDK é um módulo que permite adaptações e/ou desenvolvimento de novos componentes personalizados ou até uma biblioteca inteira, a fim de se analisar um ciclo específico. Essas adaptações podem ser realizadas devido à possibilidade de visualização e edição das equações (1ª e 2ª leis da termodinâmica, continuidade, etc..) pertinentes a cada equipamento da biblioteca padrão que podem ser realizadas na interface mostrada pela Figura 6, além da edição de componentes que fazem parte do sistema como um todo, como as conexões e composições. Utilizando uma linguagem simples, basicamente só há a necessidade de se definir variáveis, parâmetros e equações.

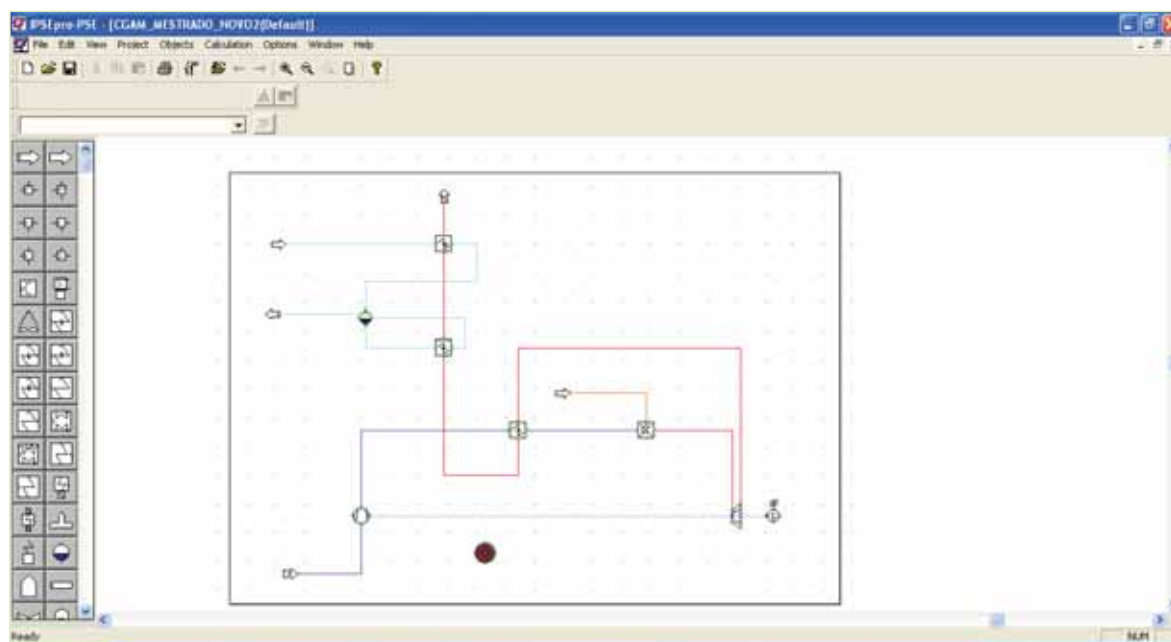
O PSE permite criar um modelo de processo baseado nos componentes da biblioteca padrão, adaptada ou criada no MDK. Uma interface simples de fluxograma com o usuário, como a da Figura 7, facilita e acelera substancialmente o desenvolvimento do esquema de processo e a apresentação dos resultados calculados. O usuário monta um diagrama de blocos, com os devidos componentes e suas conexões, e definem alguns parâmetros e variáveis com objetivo de tornar o problema determinado.

Figura 6 - Interface da biblioteca do módulo MDK do programa IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

Figura 7 - Layout de um ciclo térmico no módulo PSE do programa IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

Com o sistema térmico pronto, o programa define um sistema de equações algébricas onde estão os balanços de massa, energia, entropia, bem como todas as equações que foram introduzidas, e as resolve numericamente. Através de métodos matemáticos robustos, o programa separa as variáveis e equações em grupos, garantindo, assim, cálculos rápidos e

acurados. O método de solução utilizado é *Newton-Raphson* com técnica de checagem de fronteiras para manter a solução dentro de dados limites.

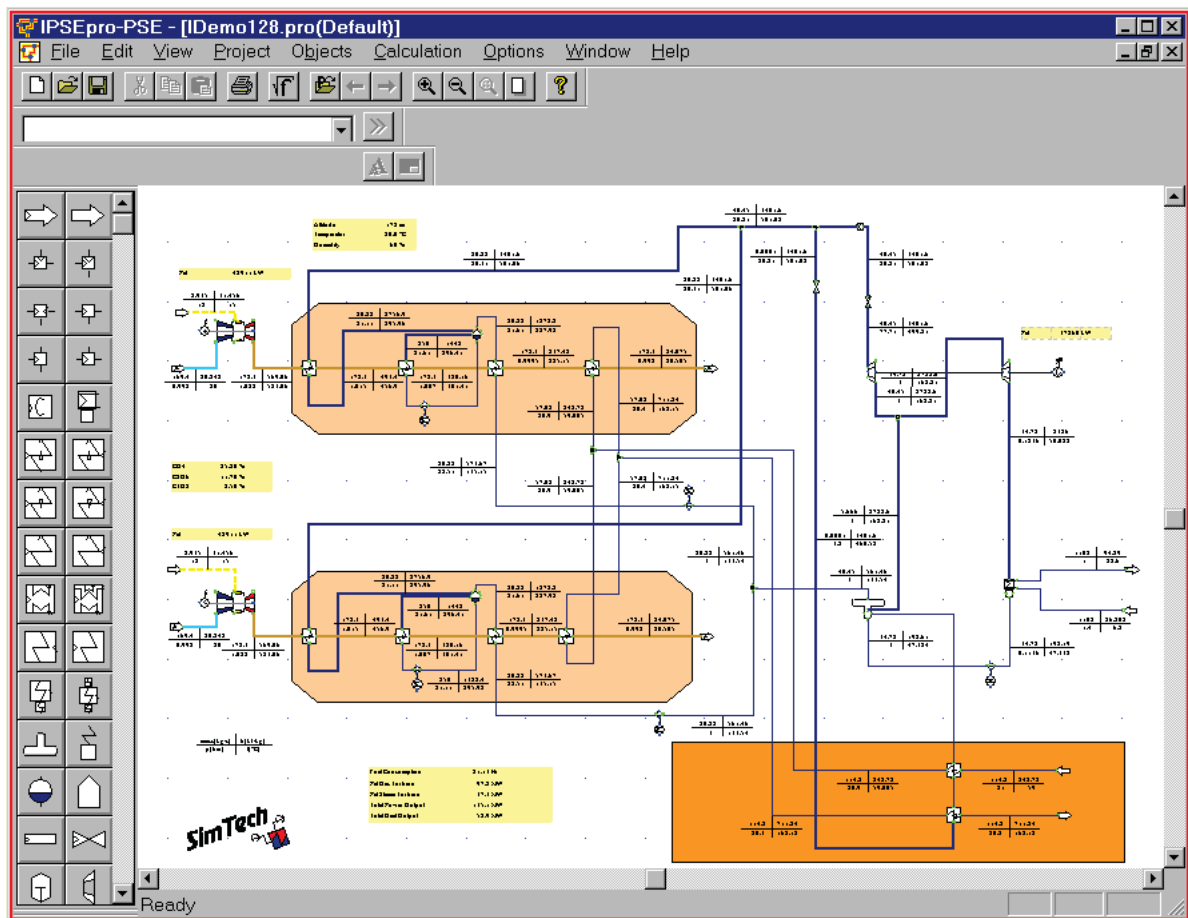
Todos os dados relacionados são entrados diretamente no fluxograma e os resultados são visualizados em tabelas que são geradas no próprio fluxograma, com propriedades termodinâmicas como temperatura, pressão, entalpia, além da vazão mássica.

A seguir são destacadas algumas das áreas onde o IPSEpro é utilizado:

- Suprimento de energia (plantas convencionais e combinadas de geração de potência);
- Modelagem de equipamentos (turbina a gás, turbina a vapor);
- Outros processos industriais (processo de refrigeração, processo de destilação e dessalinização);
- Energia alternativa (produção de energia solar, processamento de biomassa).

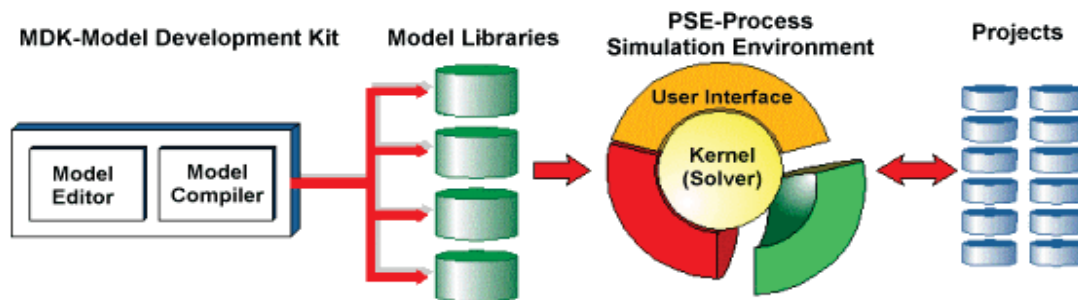
A Figura 8 mostra a interface gráfica do programa IPSEpro, sendo que sua estrutura pode ser vista na Figura 9.

Figura 8 - Tela de uma planta desenvolvida no IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

Figura 9 - Representação esquemática da estrutura do IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

4.4 PROGRAMA GATECYCLE

Com o programa GateCycle é possível analisar o desempenho, em condições de projeto e fora das condições de projeto, de plantas de ciclo combinado, caldeiras que utilizam combustíveis fósseis, sistemas de cogeração, ciclos avançados de turbinas a gás e muitos

outros sistemas de energia. O referido programa foi desenvolvido pela “*General Electric Power Systems*” em 1981 e vem sendo atualizado constantemente.

O GateCycle pode ser usado para avaliações rápidas, projeto, engenharia detalhada, “*retrofitting*” e testes de aceitação de plantas de geração de potência.

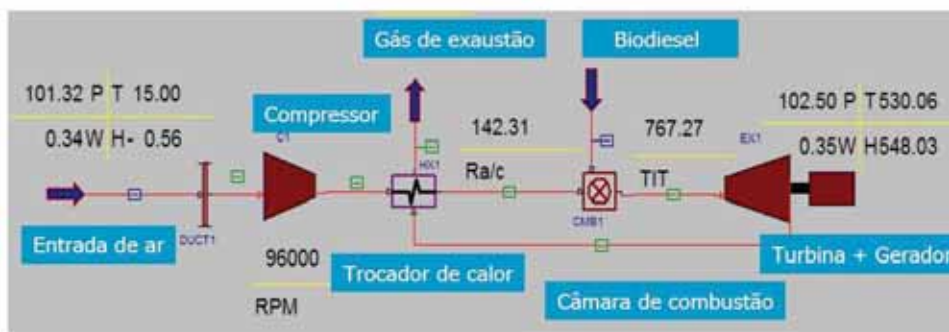
Para modelar o ciclo a gás é possível selecionar da biblioteca de turbinas a gás ou “construir” uma turbina da forma desejada, especificando cada um dos seus componentes: compressor, câmara de combustão e expensor. Assim, pode-se facilmente modelar e analisar: “*intercooler*”, reaquecedor, armazenamento de ar comprimido e turbinas em cascata.

Para modelar o ciclo a vapor é colocado à disposição do usuário um conjunto completo de ícones de componentes, o que permite modelar precisamente a caldeira de recuperação de calor HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) considerando a possibilidade de múltiplos níveis de pressão, seções paralelas e perdas de pressão.

O programa ainda possui a ferramenta *CycleLink*, que permite ao usuário analisar dados do programa no MS-Excel.

Na Figura 10 é mostrada uma planta desenvolvida no GateCycle.

Figura 10 - Planta desenvolvida no programa GateCycle.



Fonte: Corrêa Junior (2006).

4.5 PROGRAMA ASPEN PLUS

O programa Aspen Plus resolve grande parte dos problemas críticos de engenharia juntamente com os problemas operacionais que aparecem durante todo o ciclo de vida de um processo químico, tal como o projeto de um novo processo, a pesquisa de defeitos de uma unidade de processo ou a otimização das operações de um processo completo.

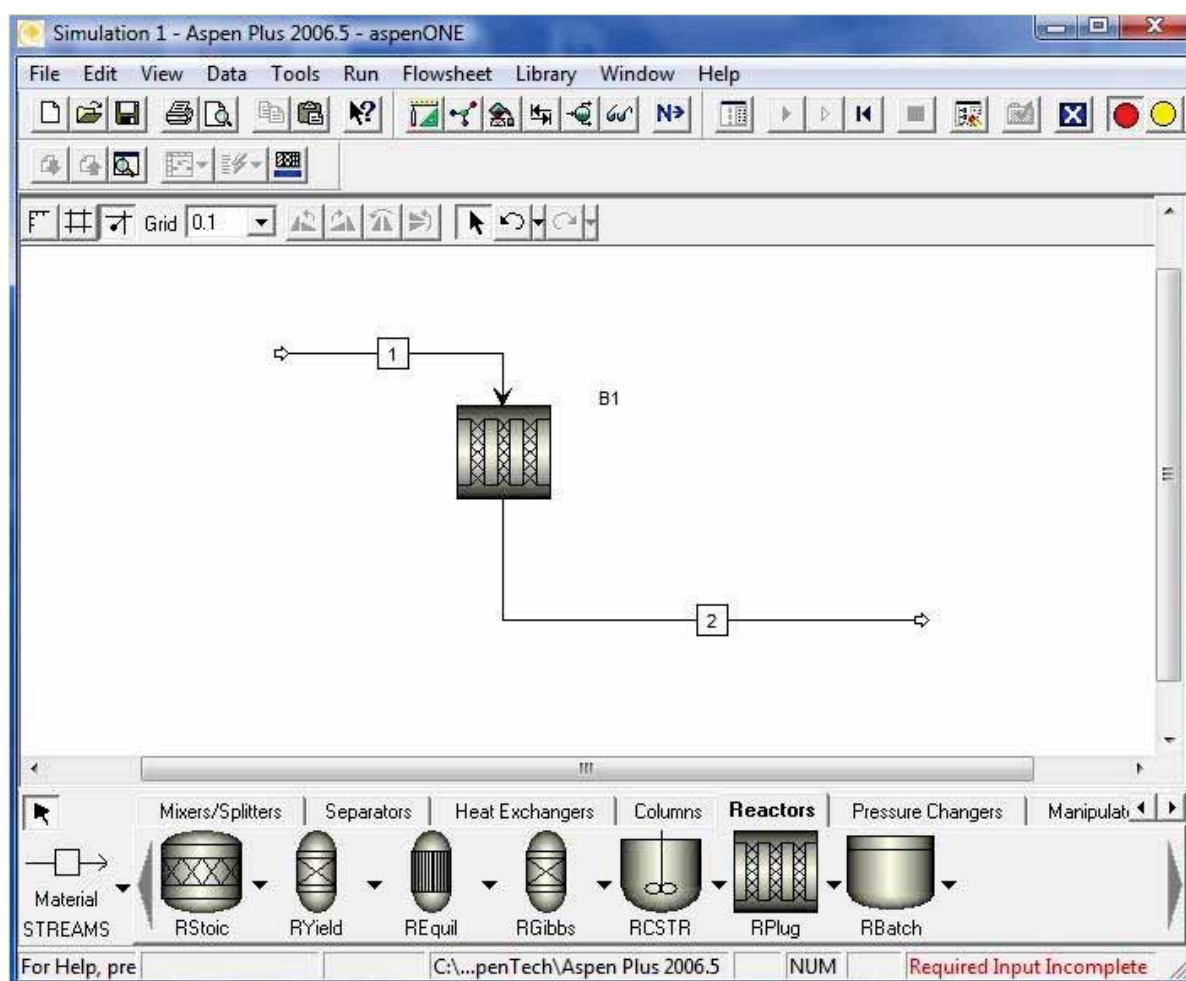
As potencialidades deste simulador de processos permitem aos engenheiros prever o comportamento de um processo usando relações básicas de engenharia, tais como balanços de massa e energia, equilíbrio de fase e químico, bem como a cinética das reações.

O Aspen Plus possui interface gráfica que permite ao usuário visualizar todas as etapas do processo que está sendo montado, bem como todos os dados de entrada que estão sendo inseridos pelo usuário, o que permite uma melhor compreensão do processo que está sendo projetado. O programa dispõe de um grande número de modelos de propriedades físicas, dados e métodos de estimativa que cobrem grande parte dos processos de comportamento simples e ideal, bem como os processos com misturas não ideais. O programa faz também um teste de convergência que analisa automaticamente e sugere métodos de convergência dos fluxogramas “*flowsheet*” e a sequência de solução para a maior parte dos “*flowsheets*” com múltiplos fluxos e recirculação de dados.

O Aspen Plus é capaz de fazer uma análise de sensibilidade para gerar convenientemente as tabelas e os gráficos que mostram como o desempenho do processo varia com mudanças feitas nas especificações do equipamento e nas condições de operação selecionadas. Através das especificações de projeto, o programa calcula condições de operação ou parâmetros de equipamentos para encontrar o desempenho desejado. A Figura 11 mostra a *interface* principal do programa.

O programa pode ainda determinar as condições de operação que maximizarão qualquer função objetivo especificada (incluindo a taxa de produção do processo, o uso de energia, pureza dos fluxos e a economicidade do processo) e promover um ajuste do modelo do processo aos dados reais da planta para assegurar uma representação exata, validando a planta real.

Figura 11 - Tela gráfica do programa Aspen Plus.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Aspen Plus.

5 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Nesta seção serão apresentados alguns detalhes do protótipo do programa desenvolvido TPPS. O programa foi desenvolvido utilizando a IDE DELPHI 7 e a linguagem *Object Pascal*, uma linguagem bastante poderosa com recursos de orientação a objeto e programação estruturada.

5.1 SOBRE O TPPS

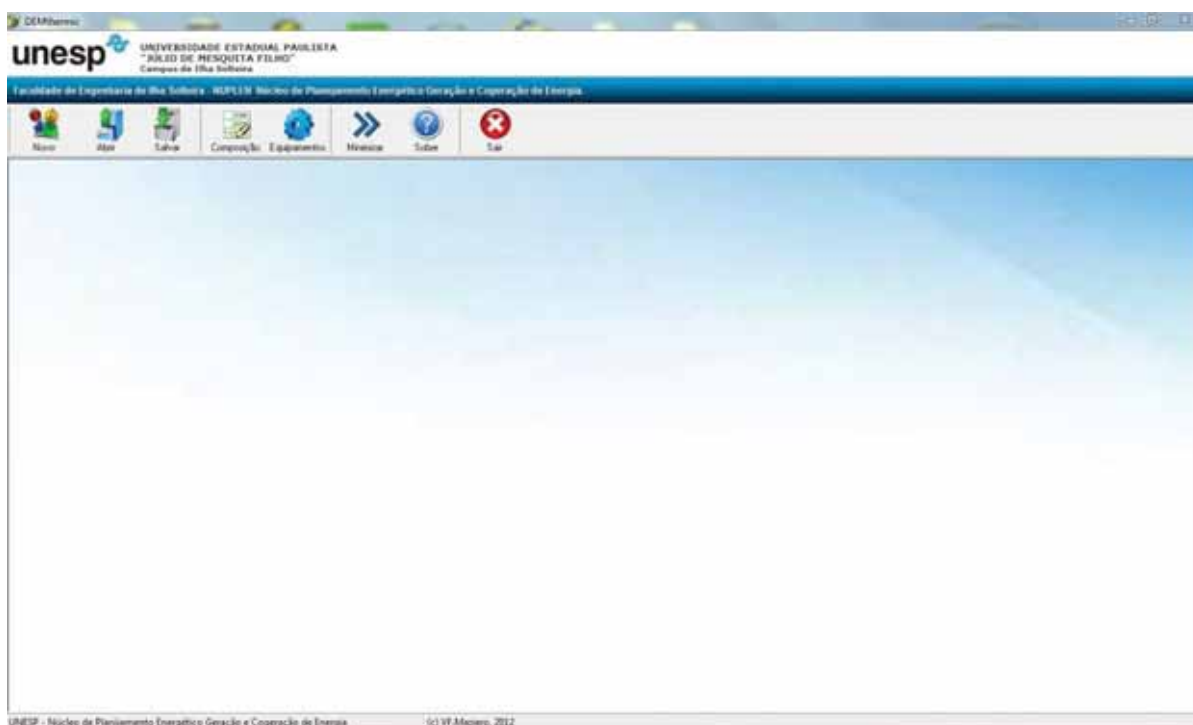
O TPPS foi desenvolvido utilizando apenas componentes nativos da IDE sem a utilização de componentes de terceiros ou particulares, para facilitar a manutenção e, também, não ficar na dependência de instalação de componentes no caso de uma futura atualização da IDE. Para fazer qualquer alteração no programa basta que a máquina tenha a IDE instalada para que possa ser utilizada.

O programa permite efetuar estudos em dois ambientes de trabalho. Um deles utiliza uma tela gráfica, na qual o usuário pode fazer uma montagem da planta utilizando os aparatos pré-configurados, sendo que cada aparato é criado e equacionado pelo próprio usuário, podendo o mesmo criar sua própria biblioteca. Uma vez definido o equacionamento de um aparato, além de suas entradas e saídas, bastam serem informadas as entradas e o aparato irá realizar a resolução do cálculo através de suas fórmulas internas, colocando os resultados nas saídas indicadas. Se esta saída estiver ligada a outro aparato, o valor será transferido automaticamente de uma saída para outra entrada e, assim, sucessivamente. O outro ambiente é constituído por meio de uma tela de texto, na qual é possível criar o equacionamento. Definindo as equações a serem resolvidas de forma *top down*, o programa irá executar e resolver cada equação, sendo que, nesta primeira versão do programa, para cada equação a ser resolvida suas variáveis devem ter um valor conhecido.

O programa permite a criação e equacionamento de novos equipamentos que poderão ser incluídos na biblioteca do mesmo sempre que for necessário, possui também uma área para definição de composição de fluidos, e roda em ambiente com sistema operacional Windows.

Na Figura 12 pode ser vista a tela principal do programa TPPS. Nesta tela o usuário tem a sua escolha as principais funções do sistema, podendo o mesmo criar um novo estudo, abrir um estudo já existente, criar um novo equipamento ou uma nova composição de fluido.

Figura 12 - Tela principal do programa TTPS.

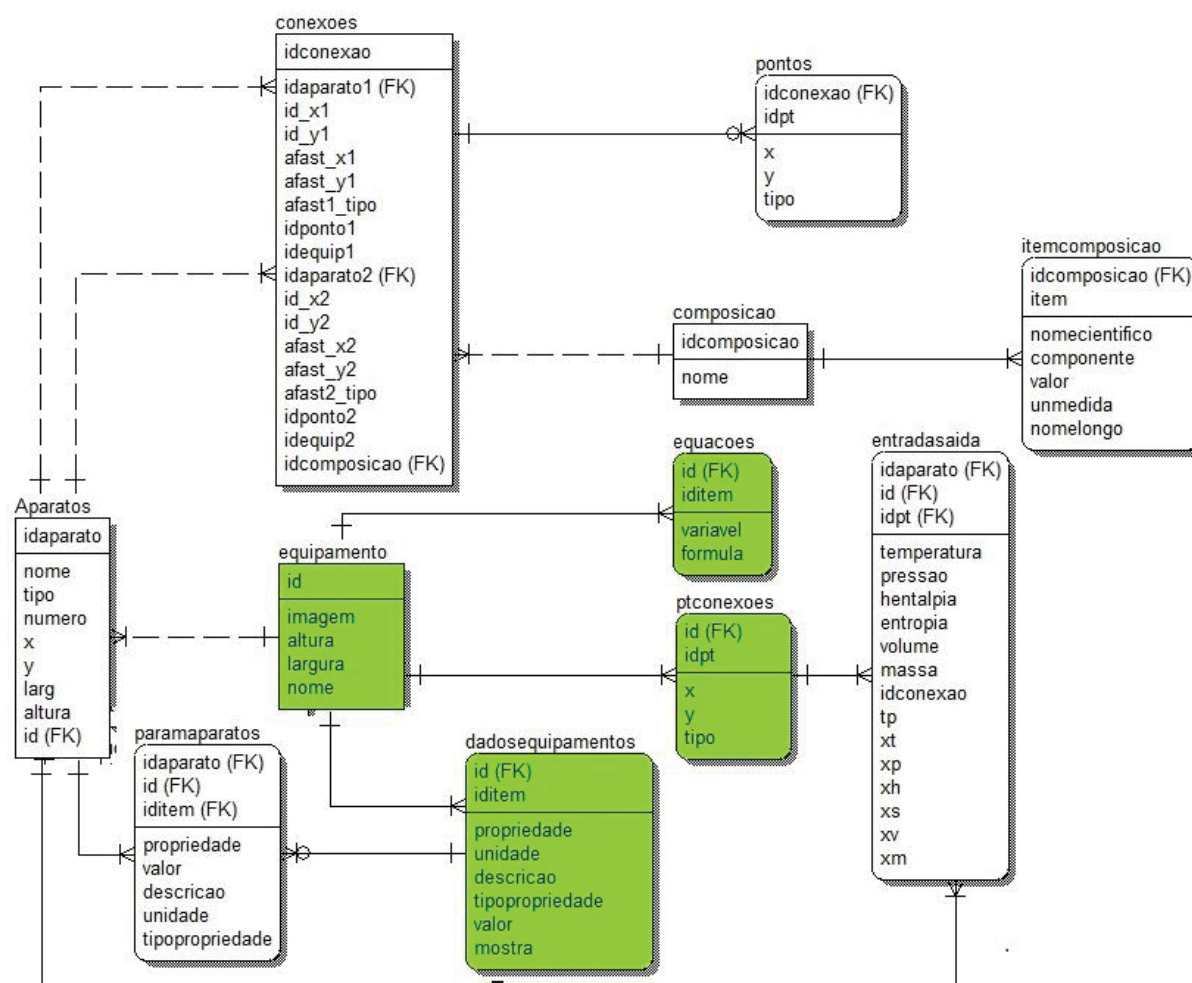


Fonte: Elaboração do autor através do programa TTPS.

O Diagrama Entidade-Relacionamento da Figura 13 mostra como está organizada a base de dados do programa, a qual é composta por 11 tabelas, sendo que 4 destas tabelas são fixas, pois armazenam os aparatos criados e suas fórmulas, e as outras 7 são carregadas a cada abertura de projeto ou a cada novo projeto criado, pois nessas tabelas são guardados os relacionamentos entre um aparato e outro, os valores de entrada e saída de cada aparato, seus respectivos parâmetros, além da composição do fluido. Esta estrutura é utilizada apenas para projeto que utilize a tela gráfica de desenho, caso o usuário opte por utilizar a tela de equacionamento, as informações serão armazenadas em arquivos textos.

A estrutura de tabelas não utiliza banco de dados, porém utiliza CLIENTDATASET, que são tabelas em memória as quais são armazenadas no disco na forma de arquivos binários, quando o usuário solicita a gravação do arquivo, mas este tipo de componente permite também o armazenamento em formato XML, que é muito utilizado para interação entre aplicações, sendo que, para tanto, faz-se necessário alterar o formato de gravação no programa fonte e recompilar.

Figura 13 - Estrutura de base de dados do programa TPPS.



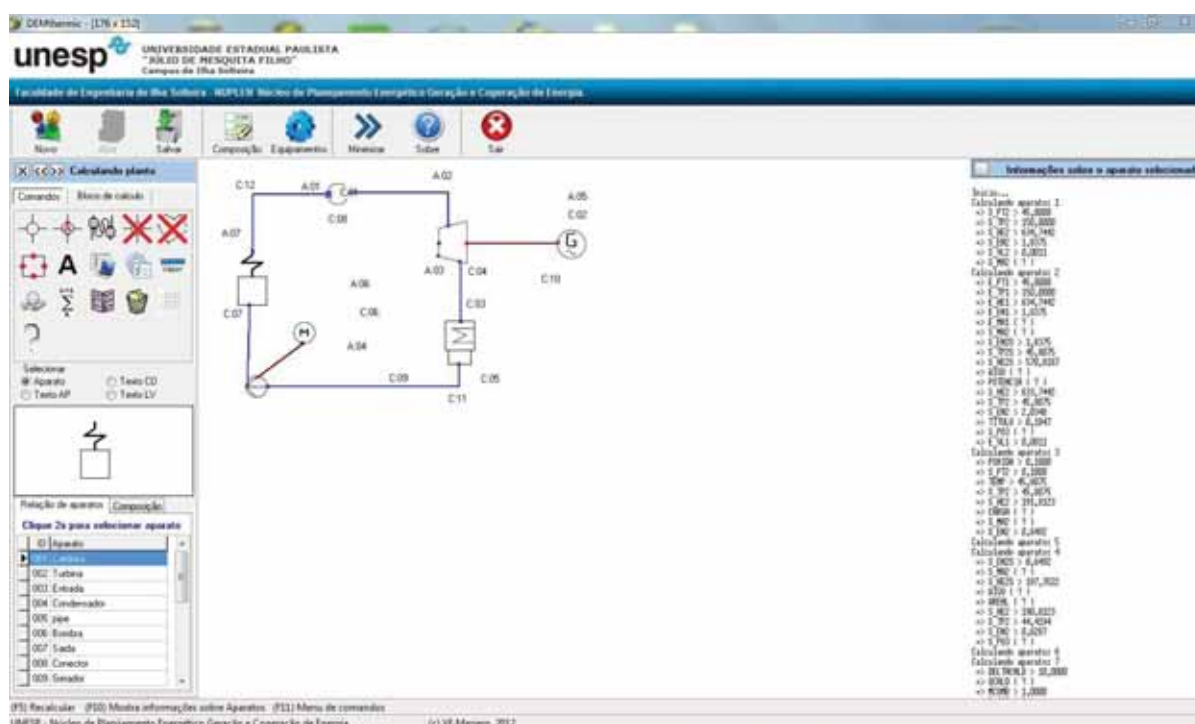
Fonte: Elaboração do autor.

As tabelas na cor verde são as tabelas de sistema com os equipamentos pré-configurados e somente são alteradas quando um novo equipamento é adicionado ao sistema, sendo elas:

- Tabela de Equipamentos (EQUIPAMENTOS);
- Tabela de Equações (EQUACOES);
- Tabela de Conexões (PTCONEXOES);
- Tabela de Dados dos Equipamentos (DADOSEQUIPAMENTOS).

As tabelas restantes são alteradas pelo programa com a inclusão e exclusão de informações conforme o desenho é montado pelo usuário na tela que pode ser vista na Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Tela de desenho do programa TPPS.



Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

A Figura 14 mostra a tela de desenhos de diagramas, na qual o usuário tem a sua disposição uma barra de objetos onde poderá selecionar os aparatos que farão parte do projeto, definir a ligação entre os aparatos, bem como os pontos de pressão, temperatura, entalpia, entropia, massa e volume. Essas propriedades são comuns a cada aparato e conexão. Também é possível nesta tela a visualização dos cálculos efetuados pelo programa para cada aparato, conforme pode ser visto do lado esquerdo da Figura 14. É permitida também a entrada dos parâmetros definidos para cada aparato e a edição do diagrama.

O editor é bem simples, possuindo recursos básicos para definição de grid, o qual permite ao usuário utilizá-lo como referência na montagem do diagrama. Para projetos futuros poderia se melhorar os recursos disponíveis no editor acrescentando-se novas ferramentas, sendo que na versão atual existe opção para selecionar pontos, mover pontos, mover aparato, excluir aparato e excluir ponto, além da opção de definição de entrada e informações de parâmetros de aparatos.

Além do cálculo na tela, o protótipo possui uma ferramenta para impressão do cálculo de uma forma mais organizada, permitindo ao usuário a impressão dessas informações, como pode ser visto na Figura 15, que representa um exemplo de cálculo do Ciclo de Rankine.

Figura 15 - Tela de resultados do cálculo no programa TPPS.

Ponto	Vazao (kg/s)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
003	30,00000	45,00000	450,00000	3324,04920	6,87672
010	30,00000	0,10000	45,80755	2350,00752	7,41563
007	30,00000	45,00000	450,00000	3324,04920	6,87672
008	30,00000	0,10000	45,80755	191,81230	0,64922
006	30,00000	55,00000	46,22381	198,32980	0,65228

004 Potencia do eixo:	29221,25047				

005 Potencia do eixo:	-195,52523				

Equipamento: Turbina					
Potencia da turbina.....	29221,25047				
Efficiencia isentropica.....	0,85000				
Potencia Isentropica.....	34377,94174				
Titulo.....	0,90223				
Equipamento: Condensador					
Perda de carga.....	0,00000				
Temperatura condensador.....	45,80755				
Diferenca de temperatura.....	0,00000				
Carga Termica.....	64745,85667				
Equipamento: Bombra					
Potencia Isentropica.....	-166,19644				
Efficiencia Isentropica.....	0,85000				
Potencia Real.....	-195,52523				
Equipamento: Caldeira					
Potencia termica.....	93771,58192				
Consumo combustivel.....	93771,58192				
Efficiencia da caldeira.....	0,00000				
Poder calorifico.....	0,00000				
Perda de carga.....	10,00000				
Valor 01.....	0,00000				

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Também é possível fazer uma inspeção nas variáveis internas de cada aparato em particular, sendo que, para isso, o usuário deverá selecionar o aparato desejado e clicar na ferramenta com sinal de “?”, que mostrará todos os valores definidos e calculados para cada uma das variáveis que fazem parte do cálculo em questão. Na Figura 14, pode ser visualizado um exemplo deste recurso. Desta forma, pode-se verificar qual variável pode estar com valor indefinido ou qual parâmetro não foi configurado.

Outra forma de resolução disponível no programa é por equacionamento, sendo que, neste caso, o usuário informa as equações e seta os valores iniciais das variáveis conforme o exemplo a seguir:

Definição das variáveis para cálculo

contante_1=1	h4=0	W_DOT_BOMBA_1=0	s10=0
m_dot_1=30	s4=0	m_dot_4=0	m_dot_10=0
m_dot_3=20	S5S=0	M_DOT_6=0	q_dot_cald=0
m_dot_2=0	T5S=0	M_DOT_5=0	pci_comb=7700
q_dot_proc=0	H5S=0	T7=0	m_dot_comb=0
T1=450	P5=0,1	S7=0	w_dot_turbina=0
h1	eta_s_turb_2=0,8	M_DOT_7=0	w_dot_total=0
s1	T5=0	DELTA_p_proc=0	eta_planta_ger=0
s2s=0	S5=0	x8=0,0	eta_planta_coger=0
t2s=0	X5=0	P8=0	sfc=0
h2s=0	H5=0	H8=0	s8=0
h2=0	DELTA_p_cond=0,0	T8=0	w_dot_turb_1=0

```

P1=45          Delta_p_cald=0      m_dot_8=0      w_dot_turb_2=0
P2=2,5         eta_cald=0,8        M_dot_9=0
S2=0           x6=0,0              h9=0
T2=0           T6=0                 p9=0
eta_s_turb_1=0,8 H6=0              t9=0
m_dot_2=0       S6=0                 s9=0
w_dot_turb_1     P6=0                 p10=55
NEGATIVO=-1     P7=2,5               S10S=0
t3=0            S7S=0                 H10S=0
p3=0            H7S=0                 h10=0
h3=0            ETA_BOMBA_1=0,7      eta_s_bomba_2=0,7
s3=0            H7=0                  t10=0
p4=0
t4=0

```

Equacionamento

```

h1=TERMO(h('Pt',P1,T1))
s1=TERMO(s('Pt',P1,T1))

s2s=s1
t2s=TERMO(T('PS',p2,s2s))
h2s=TERMO(H('PS',p2,S2s))
h2=(eta_s_turb_1*(h1-h2s)-h1)*negativo

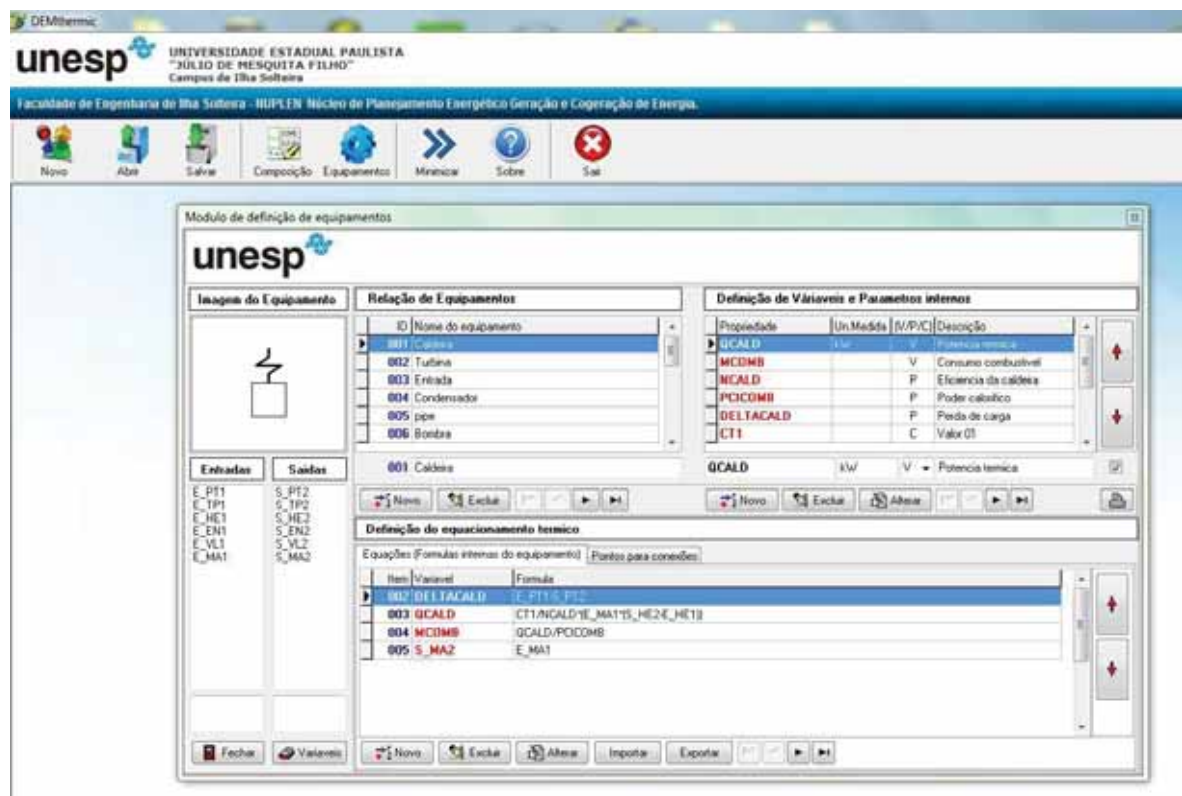
W_dot_turb_1=m_dot_1*(h1-h2)
T2=TERMO(T('ph',p2,h2))
S2=TERMO(S('PH',p2,h2))
m_dot_2=m_dot_1
m_dot_4=m_dot_2-m_dot_3
T3=T2
T4=T2
P3=P2
P4=P2
h3=TERMO(H('pt',P3,t3))
s3=TERMO(s('pt',p3,t3))
h4=TERMO(h('pt',p4,t4))
s4=TERMO(s('pt',p4,t4))

```

Na Figura 16 é mostrada a tela de criação de componentes, na qual o usuário pode adicionar e configurar um novo APARATO, sendo que o desenho do mesmo pode ser feito em qualquer aplicativo gráfico (COREL, PAINT BRUSH, PHOTOSHOP ou outro), bastando gerar uma imagem com extensão BMP e associá-la a um nome de componente.

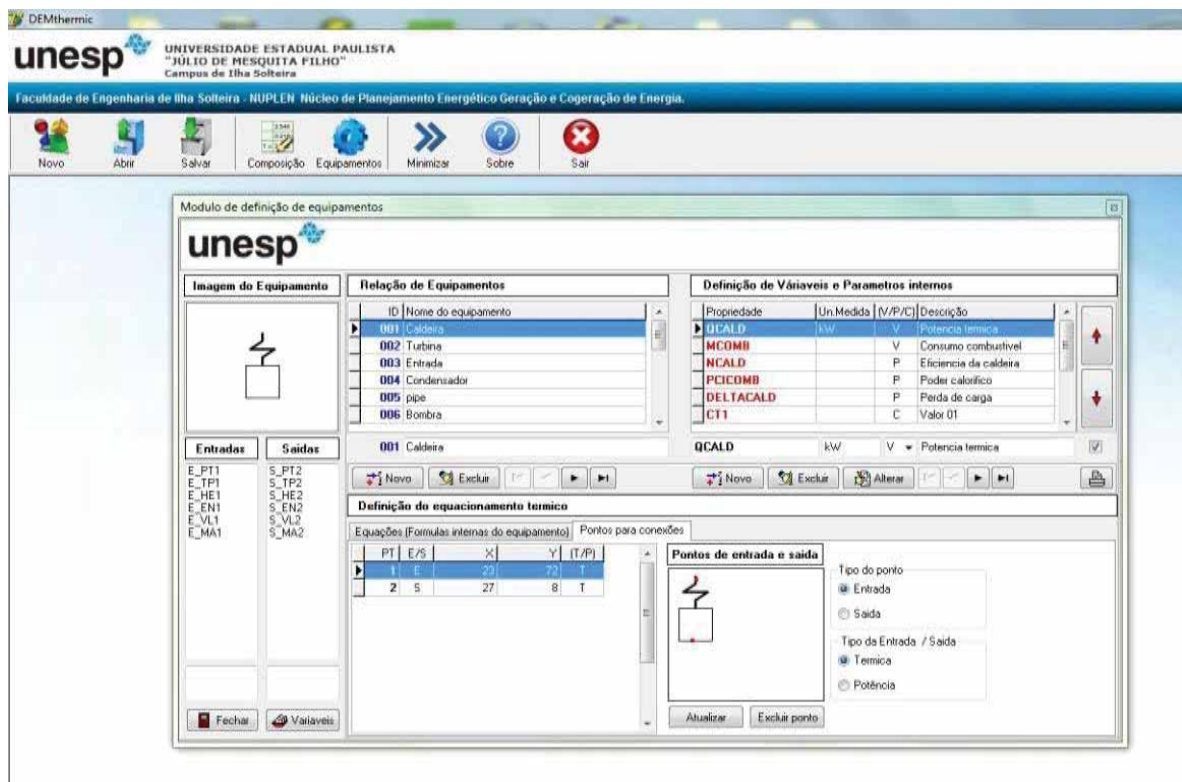
Após este processo, é necessário definir as entradas e saídas do APARATO criando-se os pontos de conexão que podem ser de ENTRADA, SAIDA e de POTENCIA ou TERMICO, conforme é mostrado na Figura 17.

Figura 16 - Tela de criação de componentes no programa TPPS.



Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Figura 17 - Tela para criação de pontos de Entrada e Saída no aparato.



Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

A definição dos pontos de entrada é muito importante, pois através dessa definição é feita a configuração e o equacionamento do equipamento. Para cada ponto térmico o usuário estará disponibilizando 6 entradas ou saídas de valores que são: PRESSÃO, TEMPERATURA, ENTALPIA, ENTROPIA, VOLUME e MASSA, sendo que essas informações deverão ser utilizadas na formulação do equacionamento, cada entrada ou saída recebe um nome e um número associado como se fosse um endereço, o qual pode ser:

- E_PTn ou S_PTn para pressão
- E_TPn ou S_TPn para temperatura
- E_HEn ou S_HEn para entalpia
- E_ENn ou S_ENn para entropia
- E_VLn ou S_VLn para volume
- E_MAn ou S_MAn para massa

Onde “n” corresponde ao número da ENTRADA ou SAÍDA, sendo que os valores dessas variáveis serão informados pelo usuário e, de acordo com as variáveis informadas, o programa irá calcular as outras propriedades e, junto com os PARAMETROS E VARIÁVEIS INTERNAS, tentará resolver as equações definidas pelo usuário, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Tela para criação de pontos de entrada e saída no aparato no programa TPPS.

The screenshot shows the 'Modulo de definição de equipamentos' window. It includes a list of equipment types (001 Caldeira, 002 Turbina, 003 Entrada, 004 Condensador, 005 pipe, 006 Bomba) and a detailed view for '001 Caldeira'. The 'Definição de Variáveis e Parâmetros internos' table lists variables like QCALD (Potencia termica), MCOMB (Consumo combustivel), NCALD (Eficiencia da caldeira), PCICOMB (Poder calorifico), DELTACALD (Perda de carga), and CT1 (Valor 01). The 'Definição do equacionamento térmico' table shows equations for items 002, 003, 004, and 005, such as '002 DELTACALD = E_PT1 - S_PT2' and '003 QCALD = CT1/NCALD * (E_MA1 - S_HE2 - HE1)'.

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Nesta tela o usuário pode definir as fórmulas, os parâmetros, as variáveis e constantes que devem ser utilizados nos cálculos, bem como definir os valores que serão calculados para cada saída. Como o TPPS é um programa inicialmente voltado para o público acadêmico, o equacionamento definido pelo usuário permite que o mesmo tenha um controle maior sobre os cálculos, mostrando como as equações foram montadas, ao contrário de alguns programas comerciais que funcionam como uma caixa preta de modo que o usuário não tem acesso a essas informações. O programa irá executar as equações de forma *top down* (de cima para baixo), colocando o resultado dos cálculos na saída correspondente. Este recurso dá ao usuário do programa uma liberdade muito grande, pois o mesmo pode criar sua biblioteca de equipamentos ou utilizar uma biblioteca criada por outra pessoa.

Para que isto fosse possível, foi necessário o desenvolvimento de um processo que analisa uma sequência de dados de entrada. No componente esta entrada é capturada do registro de uma tabela e na tela de cálculo é lida de um arquivo do tipo texto onde está armazenado o equacionamento do problema. Após a leitura, a estrutura gramatical é analisada, as variáveis e operadores são separados, transformando o texto lido em uma estrutura de dados do tipo pilha, capturando a hierarquia implícita desta entrada e suas regras para posterior execução.

Este cálculo pode ser executado uma ou mais vezes, através do método de substituição sucessiva, pois o programa possui uma matriz de variáveis definida em um instante N1 e após a primeira execução, se o usuário definir que deve ser executado mais de uma vez, o resultado da matriz é utilizado para abastecer as variáveis da matriz N1 e, assim, sucessivamente. Para cada passo uma nova matriz de resultados é gerada e pode ser visualizada pelo usuário.

As equações antes de serem resolvidas são transformadas da notação INFIXA para POSFIXA. Para somar dois números normalmente é escrito $A+B$, entretanto existem três formas de se fazer isso:

- Infixa: $(A+B)$ - Notação tradicional;
- Prefixa: $(+AB)$ - Notação polonesa;
- Posfixa: $(AB+)$ - Notação polonesa reversa.

Na notação polonesa reversa:

- Cada operador aparece imediatamente após os valores que ele deve operar;
- A ordem que o operador aparece é a mesma que ele deve ser efetuado;
- Não há necessidade do uso de parênteses.

A Figura 19 mostra exemplos de conversões para várias fórmulas.

Para resolução desses cálculos, duas classes muito importantes foram criadas as quais sustentam toda a estrutura de programação. O tamanho do vetor de variáveis para cada aparato foi limitado a 300 posições, podendo ser aumentado alterando-se o valor da constante conforme a necessidade, sendo também limitada a 50 a quantidade de fórmulas.

Figura 19 - Conversão de notações INFIXA para POSFIXA no programa TPPS.

NOTAÇÃO INFIXA	NOTAÇÃO POSFIXA
A+B*C	ABC*+
A*(B+C)	ABC+*
(A+B)/(C-D)	AB+CD-/
(A+B)/(C-D)*E	AB+CD-/E*

Fonte: Elaboração do autor.

Com este recurso o programa ficou muito flexível uma vez que o usuário interage com o programa criando fórmulas e equacionando os componentes de acordo com as suas necessidades, de modo que, se fosse desenvolvido de uma outra forma, essa interação seria impossível.

Após a definição do equacionamento do equipamento pode-se imprimir uma listagem desta tela com todas as suas configurações, conforme mostra a Figura 20. Nesta figura são mostradas as entradas e saídas com seus respectivos nomes, as variáveis e parâmetros definidos pelo usuário, mostrando também o significado de cada variável e parâmetro utilizado na montagem do equacionamento, bem como o equacionamento para uma turbina.

Figura 20 - Relatório de configuração de equipamento no programa TPPS.

```

Equipamento: 002 Turbina

1 - Variaveis de ENTRADA TERMICA
  E_PT1 pressão
  E_TP1 temperatura
  E_HE1 entalpia
  E_EN1 entropia
  E_VL1 volume especifico
  E_MA1 massa
  E_PT5 pressão
  E_TP5 temperatura
  E_HE5 entalpia
  E_EN5 entropia
  E_VL5 volume especifico
  E_MA5 massa

2 - Variaveis de ENTRADA DE POTENCIA
  E_PO4 potencia

3 - Variaveis de SAIDA TERMICA
  S_PT2 pressão
  S_TP2 temperatura
  S_HE2 entalpia
  S_EN2 entropia
  S_VL2 volume especifico
  S_MA2 massa

4 - Variaveis de SAIDA DE POTENCIA
  S_PO3 potencia

5 - Variaveis INTERNAS AO EQUIPAMENTO
                                     S_HE2S      0,00000
                                     S_TP2S      0,00000
                                     S_EN2S      0,00000
Potencia da turbina                 POTENCIA  0,00000 kW
Eficiencia isentropica              ETAISO    0,85000
Potencia Isentropica                WISO      0,00000 kW
Titulo                             TITULO     0,00000

6 - Equacionamento termico do equipamento
001 E_PT1      E_PT1+E_PT5
002 E_TP1      E_TP1+E_TP5
003 E_HE1      E_HE1+E_HE5
004 E_EN1      E_EN1+E_EN5
005 E_MA1      E_MA1+E_MA5
006 S_MA2      E_MA1
007 S_EN2S     E_EN1
008 S_TP2S     TERMO(TEMPERATURA('PS',S_PT2,S_EN2S))
009 S_HE2S     TERMO(ENTALPIA('PS',S_PT2,S_EN2S))
010 WISO       E_MA1*(E_HE1-S_HE2S)
011 POTENCIA   ETAISO*WISO
012 S_HE2      E_HE1-(POTENCIA/E_MA1)
013 S_TP2      HTERMO(TEMPERATURA('PH',S_PT2,S_HE2))
014 S_EN2      TERMO(ENTROPIA('PH',S_PT2,S_HE2))
015 TITULO     HTERMO(TITULO('PH',S_PT2,S_HE2))
016 S_PO3      POTENCIA+E_PO4
017 E_VL1      E_VL1+E_VL5

```

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Duas classes foram criadas para representar e calcular cada objeto. O programa considera cada objeto como sendo do tipo “Taparato”. Esta classe possui vários métodos além de herdar a classe “Tformula”, que contem o equacionamento do equipamento. Ambas as classes criadas com seus métodos e variáveis podem ser analisadas a seguir.

5.2 CLASSES TFORMULA E TAPARATO NO PROGRAMA TPPS

As classes “Tformula” e “Taparato” são responsáveis pelos objetos criados e o equacionamento de cada um deles. Uma armazena as informações do objeto e a outra o equacionamento e/ou cálculos a serem efetuados, conforme mostrado a seguir:

```
// Constantes
const tamanho vetor = 300;
      tqtf formulas = 50;
type

// Definição da estrutura de dados do vetor de calculo
ttipodados = record
      variáveis :array[1..tamanho vetor] of string;
      valores :array[1..tamanho vetor] of real;
      marcacao :array[1..tamanho vetor] of integer;
      mostra :array[1..tamanho vetor] of string;
      texto :array[1..tamanho vetor] of string;
      unidade :array[1..tamanho vetor] of string;
      critpara :array[1..tamanho vetor] of real;
      sinal :array[1..tamanho vetor] of string;
      pulo :array[1..tamanho vetor] of integer;
      valor_ini :array[1..tamanho vetor] of real;
      valor_fim :array[1..tamanho vetor] of real;
      tpvar :array[1..tamanho vetor] of string;
      valorant :array[1..tamanho vetor] of real;
      chutada :array[1..tamanho vetor] of string;
      erro :array[1..tamanho vetor] of real;
end;

// Classe Tformula responsavel pela resolução das formulas e conversão das expressões de
// Infixa para PosFixa e da comunicação com a biblioteca FLUIDPROP para obtenção de
// valores térmicos calculados.

tformula = class
private
      sinal,saida:string;
      conta_letra:integer;
      conta_sinal:integer;
      pilha_valor:array[1..tamanho vetor] of real;
      dados:ttipodados;

      formula:string;
      constructor create;

      procedure empilha(entrada:string);
      procedure desempilha(var entrada:string);
      procedure empilhavalor(entrada:string;valor:real);
      procedure desempilhavalor(var entrada:real);
      procedure saidaFormula(entrada:string);
      function pilhavazia:boolean;
      function executefuncao(entrada:string):double;
      procedure Calculostermicos(tipo,funcao:string;valor1,valor2:double;var retorno:double);
public
      calculadora:boolean;
```

```

procedure posfixa(var entrada:string);
procedure ValoresVariaveis(entrada:ttipodados);
function Executar(entrada:string):real;
function ObtemValor(entrada:string):double;
function IncrementaVariavel(var entrada:ttipodados):boolean;
function IncrementaVariavelSub(var entrada:ttipodados;variavel:string):boolean;
function PodePararAgora(entrada:ttipodados):boolean;
end;

// Classe Taparato responsável pelo calculo interno e funcionamento de cada aparato, aqui é
// definido o funcionamento do objeto e o que deve ser feito com as fórmulas, variáveis e
// parâmetros definidos pelo usuário.

taparato = class
private
  idaparato:integer;
  Calculado:boolean;
  dados:ttipodados;          // variaveis e valores
  equacionamento:array[1..tqtformulas,1..2] of string; // formulas
  calcular:tformula;
  termo:tfluidprop;

  constructor create;
public
  procedure obterdados(equipto:integer);
  procedure Calculostermicos(var p,t,h,s,v,m:double);
  procedure atualizadados;
  procedure exhibevalores(var entrada:trichedit);
  procedure GravaValores;
  procedure ObtemPontosES;
  procedure Alteravaliar(variavel:string;valor:real;un:string);
  function RetornarValor(variavel:string):real;
  procedure defineAparato(ap:integer);
  procedure calculaAparato;
  function DeveCalcular:boolean;
  procedure calculo(tipo:boolean);
  procedure LimparValores;
  procedure Inspeccionar(var texto:trichedit);
end;

```

Para a resolução dos cálculos termodinâmicos o programa desenvolvido utiliza a biblioteca FluidProp desenvolvida pela Universidade de Delft, da Holanda, que calcula a propriedade de vários tipos de fluidos, inclusive da água, a partir da entrada de duas propriedades conhecidas. Esta biblioteca recebe as informações do aplicativo, já convertidas e pré-tratadas, efetua os cálculos termodinâmicos e os devolve à aplicação, sendo que as chamadas à essa biblioteca são feitas através do método “Calculostermicos”, conforme o exemplo a seguir:

```

Procedure Calculostermicos (tipo, funcao: string; valor1, valor2: double; var retorno:
double)

```

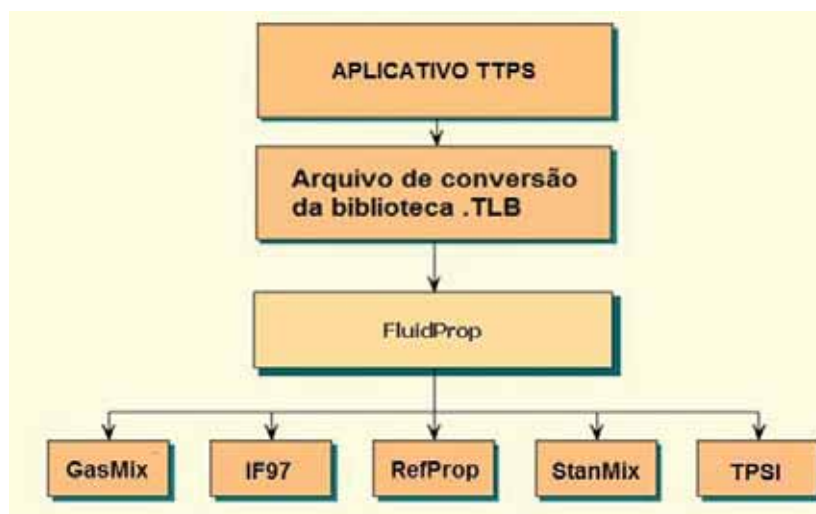
O FluidProp é uma biblioteca de programa que está em conformidade com o padrão COM e, portanto, pode ser perfeitamente chamada por muitos programas diferentes e ambientes de programação, tais como: Microsoft Excel, MATLAB, Maple, Visual Basic, Fortran e Borland C++. Mas, segundo seus idealizadores, não era possível esta biblioteca comunicar-se com o Delphi, porém, durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível fazer a importação de biblioteca criando um arquivo de comunicação, sendo a mesma depois disponibilizada aos criadores deste recurso. Este arquivo faz a intermediação entre os dois ambientes fazendo-se uma conversão nos parâmetros enviados para biblioteca e, ao ser compilado junto, se torna possível a utilização com o Delphi, conforme a estrutura que pode ser vista na Figura 21.

Cada objeto calculado não possui ligação alguma com o outro a não ser por suas conexões e variáveis de saída ou entrada, o objeto funciona como uma caixa preta que ao receber a informação faz o processamento dos dados e coloca na saída os valores calculados, conforme exemplo mostrado na Figura 22.

A Figura 22 mostra o funcionamento de um aparato pré-configurado, o qual funciona como uma caixa preta, o usuário entra com os valores que possui e o aparato, através do seu equacionamento interno, irá efetuar os cálculos e colocá-los na saída indicada.

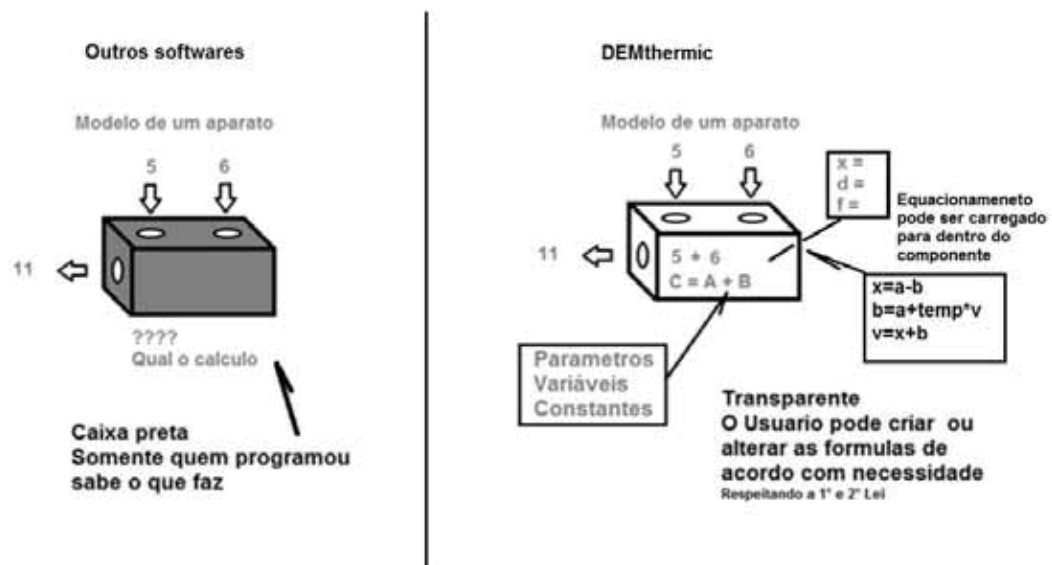
Outra fórmula de se resolver os problemas é montando o equacionamento do problema na tela de resolução de cálculos, a qual possui 3 sub divisões, sendo que em uma delas o usuário define as variáveis a serem utilizadas, na outra tela o equacionamento e na última tela são apresentados os resultados, conforme mostra a Figura 23.

Figura 21 - Modelo de comunicação entre o aplicativo e o FluidProp no programa TPPS.



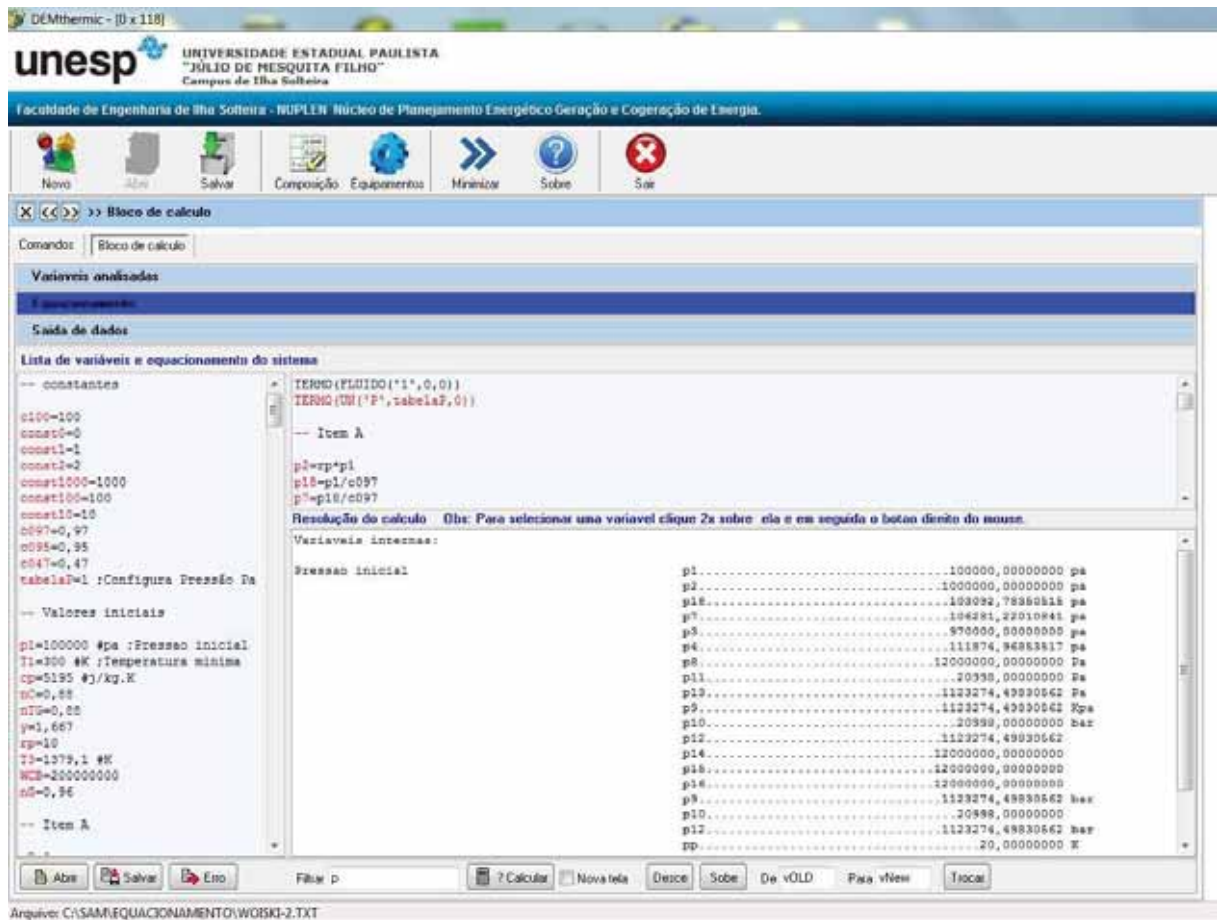
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 22 - Funcionamento da estrutura de cálculo dos aparatos no programa TPPS.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 23 - Tela de definição de variáveis e equacionamento do problema.



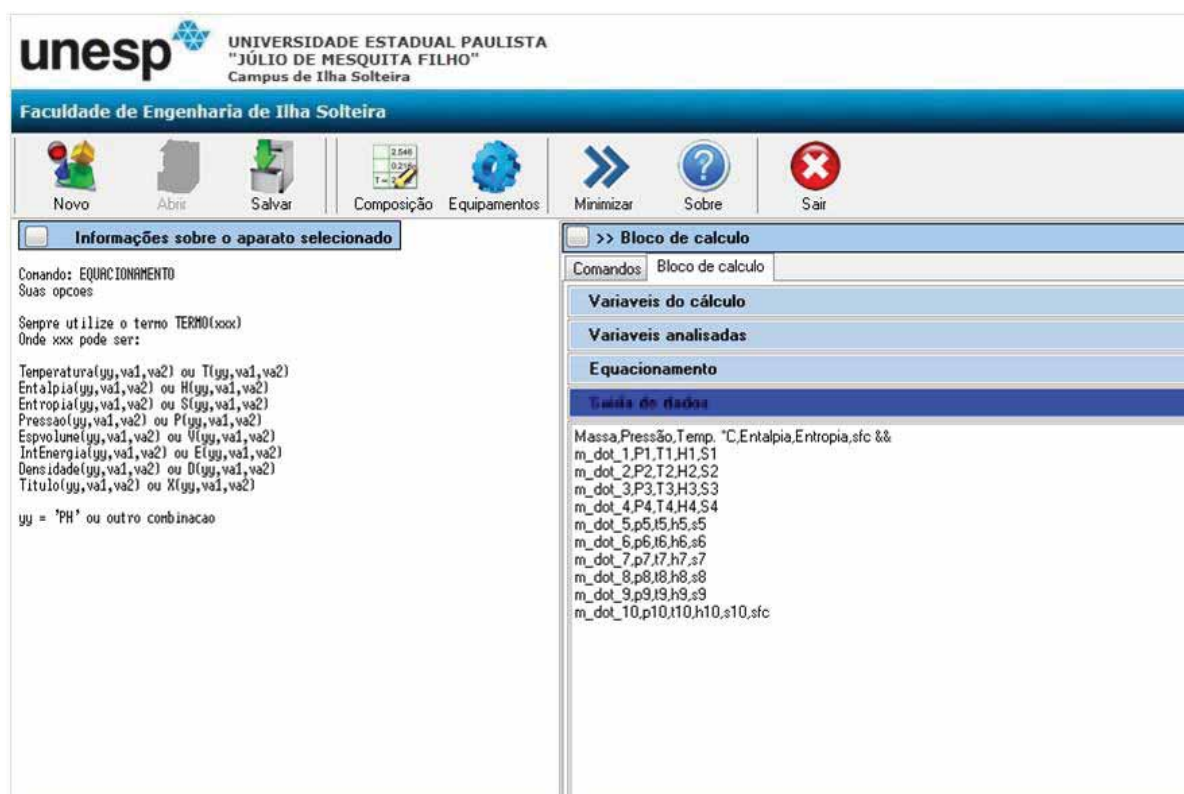
Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Nesta tela o usuário define e informa os valores das variáveis que irão ser utilizadas no equacionamento, se a variável possuir algum valor o mesmo deve ser informado (exemplo: $P_2=2,5$ ou $P_2=0$).

A definição do equacionamento é o processo onde o usuário define os valores conhecidos das variáveis e informa as fórmulas do equacionamento do problema, sendo que estas fórmulas devem ser informadas em uma sequência *top down*. Uma vez definido o equacionamento, deve-se clicar no botão calcular para ativar o módulo de cálculo. Caso a opção “Filtrar” tenha algum conteúdo informado, o programa irá mostrar somente as variáveis que se iniciem pelas letras informadas.

A Figura 24 mostra como pode ser definida outra forma de apresentação dos dados, sendo que o usuário pode montar uma tabela com as variáveis que deseja visualizar.

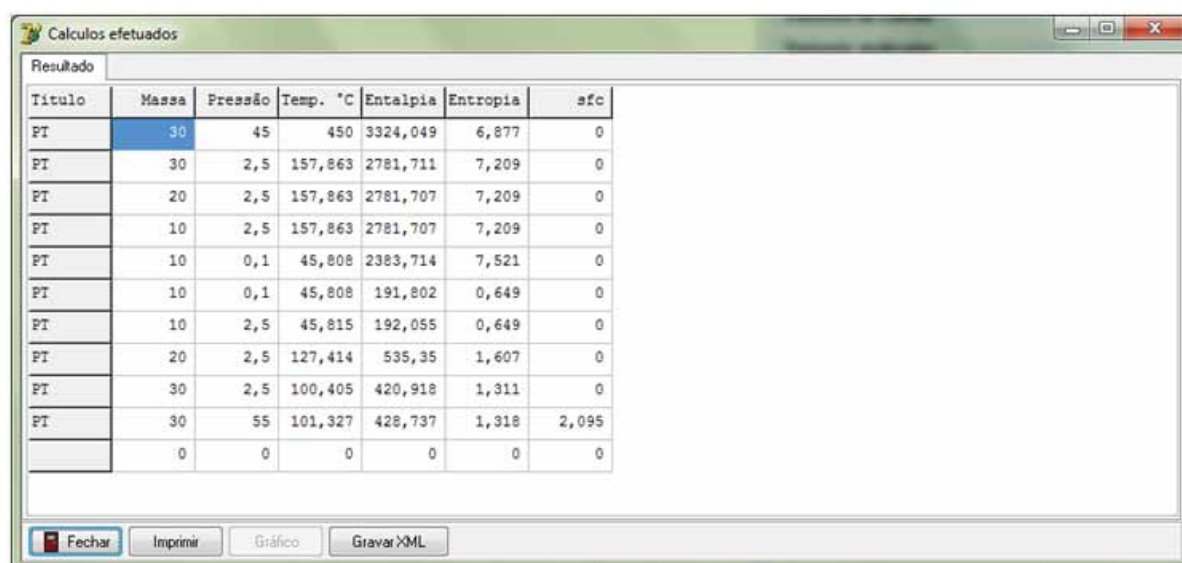
Figura 24 - Formatação da saída de dados no programa TPPS.



Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

A saída de dados é a forma de visualizar as informações, sendo que o programa permite que o usuário configure como as informações deverão ser apresentadas. Para a configuração apresentada na Figura 24 pode ser visto o resultado de saída na Figura 25.

Figura 25 - Tela de saída de resultados no programa TPPS.



Calculos efetuados

Resultado

Titulo	Massa	Pressão	Temp. °C	Entalpia	Entropia	sfc
FI	30	45	450	3324,049	6,877	0
FI	30	2,5	157,863	2781,711	7,209	0
FI	20	2,5	157,863	2781,707	7,209	0
FI	10	2,5	157,863	2781,707	7,209	0
FI	10	0,1	45,808	2383,714	7,521	0
FI	10	0,1	45,808	191,802	0,649	0
FI	10	2,5	45,815	192,055	0,649	0
FI	20	2,5	127,414	535,35	1,607	0
FI	30	2,5	100,405	420,918	1,311	0
FI	30	55	101,327	428,737	1,318	2,095
	0	0	0	0	0	0

Fechar Imprimir Gráfico Gravar XML

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

6 SIMULAÇÕES DE PLANTAS DE GERAÇÃO E COGERAÇÃO ATRAVÉS DE PROGRAMAS DISPONÍVEIS

Nesta seção é realizado um estudo termodinâmico comparativo entre quatro programas de simulação numérica para plantas térmicas e de potência, sendo que três deles são comerciais, bem conhecidos, e bastante utilizados no meio acadêmico (EES, Cycle-Tempo e IPSEpro), e o quarto é o programa desenvolvido no NUPLIN (TPPS). Para tanto, serão consideradas plantas básicas de geração e cogeração de energia.

A metodologia de simulação consiste na avaliação dos processos através dos dados de desempenho dos equipamentos. Para isto é preciso definir as condições de operação e alguns parâmetros de projeto. O objetivo não é especificar os equipamentos, mas estudar os processos que envolvem estes equipamentos.

Para a análise termodinâmica são admitidas como hipóteses gerais as seguintes:

- Operação em regime permanente, na condição de operação da instalação;
- Ar atmosférico, combustível e produtos de combustão são tratados como uma mistura de gases ideais;
- Energias cinética e potencial dos gases são desprezadas;
- Processos adiabáticos em todos os equipamentos que fazem parte dos ciclos, exceto para os trocadores de calor para os quais um parâmetro de eficiência define a quantidade de calor transferida ao meio.

6.1 DEFINIÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS

Dois tipos de casos básicos são estudados neste trabalho um de geração e outro de cogeração de energia, os quais serão descritos a seguir.

6.1.1 Planta de geração de energia

A planta de geração a ser estudada é mostrada na Figura 26. A mesma é composta por uma turbina, uma caldeira, uma bomba e um condensador, sendo conhecida a eficiência isentrópica da turbina e a calcular a temperatura de saída. Na situação em que são fornecidas as propriedades de entrada na turbina (P_1 e T_1), a pressão de saída (P_2), a vazão ($\dot{m}$) e a eficiência isentrópica da turbina (η_{iso}), sendo todas as propriedades na *entrada* determinadas em função da pressão e temperatura.

Uma vez que as propriedades de entrada da bomba são conhecidas e, conhecendo-se a eficiência isentrópica (η_B), a pressão de saída e a entropia isentrópica, determina-se a entalpia isentrópica, sendo a temperatura calculada em função da pressão de saída e da entalpia.

O misturador aqui especificado é utilizado apenas para realizar misturas de fluidos de mesma composição, por exemplo, água líquida com água líquida ou até mesmo água líquida com vapor d' água, não sendo utilizado para misturas de diferentes composições, como vapor e produtos de combustão. Define-se o balanço de massa conhecendo-se as vazões de entrada. Conhecendo-se também as propriedades dos fluxos de entrada (P e T), as outras propriedades nos fluxos de entrada podem ser determinadas.

A bifurcação serve para separar um fluxo em duas partes. As propriedades dos fluxos de saída serão as mesmas do fluxo de entrada, de forma que não é necessário se aplicar a primeira e a segunda lei. As outras propriedades serão determinadas em função das pressões e temperaturas nos pontos, que já serão conhecidas. É necessário apenas aplicar o balanço de massa, sendo que, em geral, a massa de entrada é conhecida e uma das outras deverão ser informadas.

O objetivo da simulação da caldeira é determinar a potência térmica do equipamento ($\dot{Q}_{cald}$), o consumo de combustível ($\dot{m}_{comb}$) e a perda de carga da caldeira, uma vez informada a eficiência da caldeira (η_{cald}) e o poder calorífico inferior do combustível (PCI_{comb}).

Para a planta de cogeração deverão ser considerados os seguintes pontos para comparação:

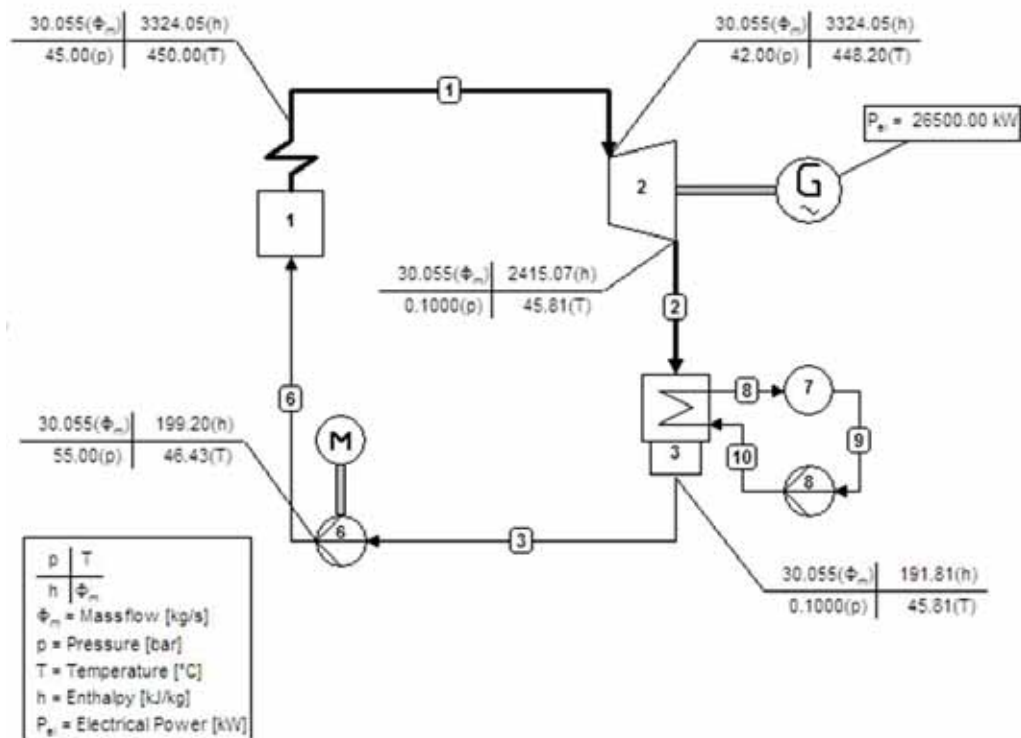
- Ponto 1: Saída da caldeira e entrada na turbina;
- Ponto 2: Saída da turbina 1;
- Ponto 3: Extração da turbina para entrada no processo;
- Ponto 4: Entrada na turbina 2;
- Ponto 5: Saída da turbina 2 e entrada no condensador;
- Ponto 6: Saída do condensador e entrada na bomba 1;
- Ponto 7: Saída da bomba 1 e entrada no misturador;
- Ponto 8: Saída do processo para entrada no misturador;
- Ponto 9: Saída do misturador e entrada na bomba da caldeira;
- Ponto 10: Saída da bomba e entrada da caldeira.

6.2 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA CYCLE-TEMPO

6.2.1 Simulação da planta geração no programa Cycle-Tempo

A Figura 28 mostra a planta de geração no programa Cycle-Tempo e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com a simulação.

Figura 28 - Planta de geração resolvida pelo Cycle-Tempo.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Tabela 2 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa Cycle-Tempo.

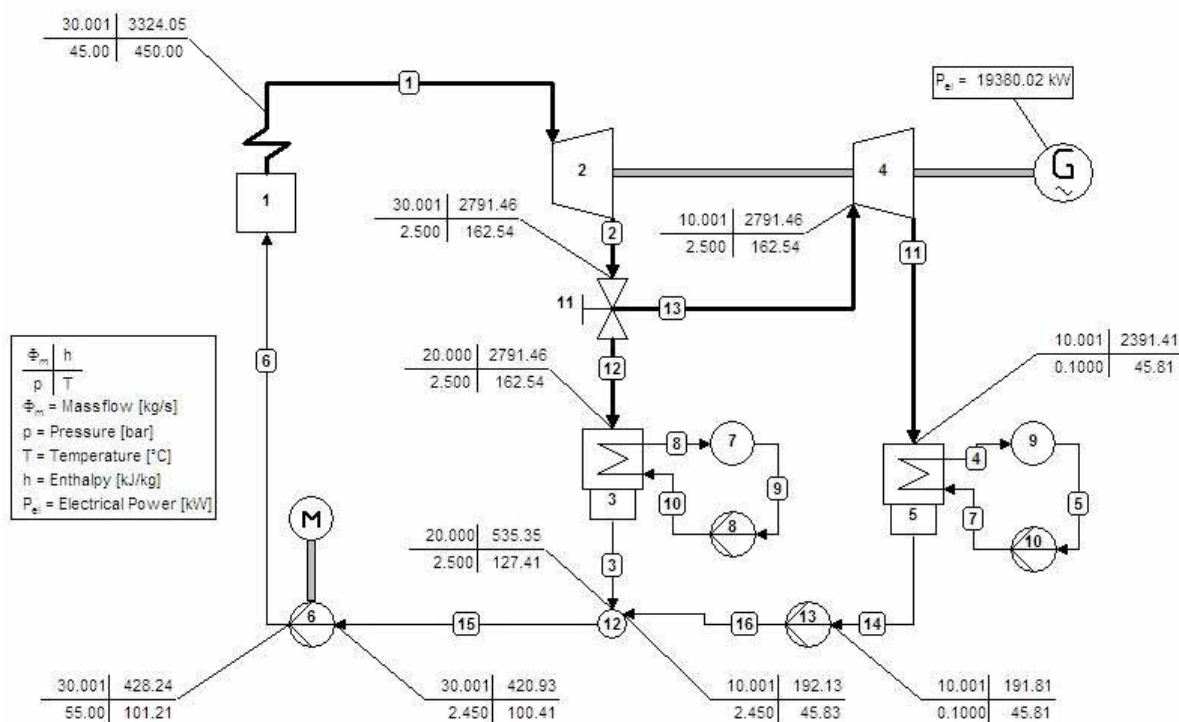
Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.324,05	6,9070
02	30	0,1	45,81	2.415,07	7,6960
03	30	0,1	45,81	191,81	0,6490
04	30	55	46,43	199,20	0,6550

Fonte: Elaboração do autor.

6.2.2 Simulação da planta de cogeração no programa Cycle-Tempo

A Figura 29 mostra a planta de cogeração no programa Cycle-Tempo e a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com a simulação.

Figura 29 - Planta de cogeração resolvida pelo Cycle-Tempo.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Tabela 3 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa Cycle-Tempo.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.324,05	6,876
02	30	2,5	162,54	2.791,46	7,231
03	20	2,5	162,54	2.791,46	7,231
04	10	2,5	162,54	2.791,46	7,231
05	10	0,1	45,81	2.391,41	7,545
06	10	0,1	45,81	191,81	0,649
07	10	2,5	45,83	192,13	0,649
08	20	2,5	127,41	535,35	1,607
09	30	2,45	100,41	420,93	1,311
10	30	55	101,21	428,24	1,316

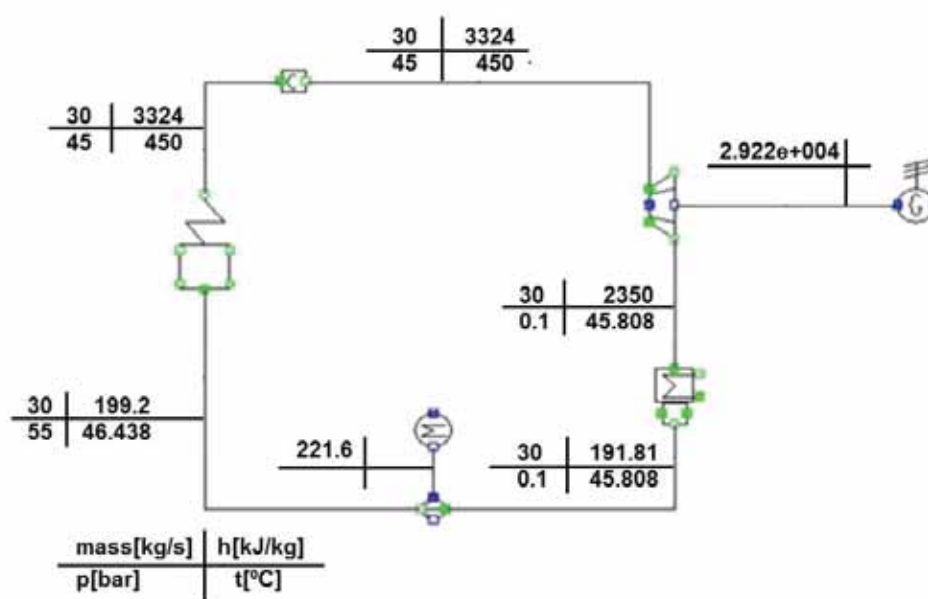
Fonte: Elaboração do autor.

6.3 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA IPSEPRO

6.3.1 Simulação da planta de geração com o programa IPSEpro

A Figura 30 mostra a planta de geração no programa IPSEpro e a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a simulação.

Figura 30 - Planta de geração resolvida pelo IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

Tabela 4 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa IPSEpro.

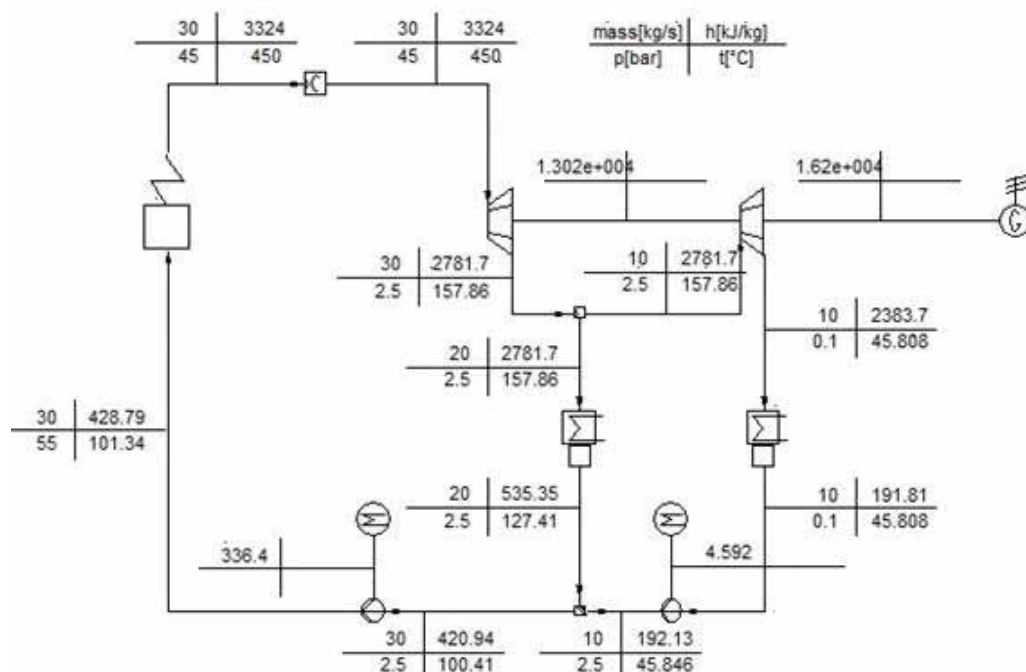
Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.324	6,877
02	30	0,1	45,808	2.350	7,415
03	30	0,1	45,808	191,81	0,639
04	30	55	46,438	199,20	0,655

Fonte: Elaboração do autor.

6.3.2 Simulação da planta de cogeração com programa IPSEpro

A Figura 31 mostra a planta de cogeração no programa IPSEpro e a Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com a simulação.

Figura 31 - Planta de cogeração resolvida pelo IPSEpro.



Fonte: Elaboração do autor através do programa IPSEpro.

Tabela 5 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa IPSEpro.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.344,0	6,877
02	30	2,5	157,86	2.781,7	7,209
03	20	2,5	157,86	2.781,7	7,209
04	10	2,5	157,86	2.781,7	7,209
05	10	0,1	45,81	2.383,7	7,521
06	10	0,1	45,81	191,81	0,649
07	10	2,5	45,85	192,13	0,650
08	20	2,5	127,41	535,35	1,607
09	30	2,5	100,41	420,94	1,312
10	30	55	101,34	428,79	1,318

Fonte: Elaboração do autor.

6.4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA EES

6.4.1 Simulação da planta de geração com o programa EES

A seguir é apresentado o equacionamento da planta de geração para resolução no aplicativo EES, a Figura 32 e a Tabela 6 mostram os resultados obtidos.

"Pressão em bar, temperatura em °C, vazão em kg/s, entalpia em kJ/kg, entropia em kJ/kg K, potencia em kW"

"Propriedades na saída da caldeira"

m_dot = 30 "[kg/s]"

T1 = 450 "[C]"

P1 = 45 "[bar]"

h1 = ENTHALPY(Steam;T=T1;P=P1)

s1 = ENTROPY(Steam;T=T1;P=P1)

"Turbina"

P2 = 0,1 "[bar]"

s2s = s1 "[kJ/kg K]"

T2s = TEMPERATURE(Steam;s=s2s;P=P2)

h2s = ENTHALPY(Steam;s=s2s;P=P2)

s2 = ENTROPY(Steam;T=T2;P=P2)

"Determinação se a entalpia h2"

eta_s_turb = (h1-h2)/(h1-h2s)

eta_s_turb = 0,85

W_dot_turb = m_dot*(h1-h2) "[kW]"

T2 = TEMPERATURE(Steam;h=h2;P=P2)

x2 = QUALITY(Steam;h=h2;P=P2)

"Condensador"

DELTA_p_cond = 0,0 "[bar]"

P3 = P2 - DELTA_p_cond "[bar]"

x3 = 0,0

T3 = TEMPERATURE(Steam;x=x3;P=P3)

h3 = ENTHALPY(Steam;x=x3;P=P3)

s3 = ENTROPY(Steam;x=x3;P=P3)

Q_dot_cond = m_dot*(h3-h2) "[kW]"

"Bomba"

P4 = 55 "[bar]"

s4s = s3 "[kJ/kg K]"

h4s = ENTHALPY(Steam;s=s4s;P=P4)

s1 = ENTROPY(Steam;T=T1;P=P1)

eta_s_bomba = 0,7

"Determina-se a entalpia h4"

h4 = h3 - (1/eta_s_bomba)*(h3-h4s) "[kJ/kg]"

W_dot_bomba = m_dot*(h3-h4) "[kW]"

T4 = TEMPERATURE(Steam;h=h4;P=P4)

S4= ENTROPY(Steam;T=T4;P=P4)

"Caldeira"

```

DELTA_p_cald = P4 - P1    "[bar]"
eta_cald = 0,85
Q_dot_cald = (1/eta_cald)*m_dot*(h1-h4)    "[kW]"
PCI_comb = 7700 "[kJ/kg]"
m_dot_comb = Q_dot_cald/PCI_comb    "[kg/s]"

```

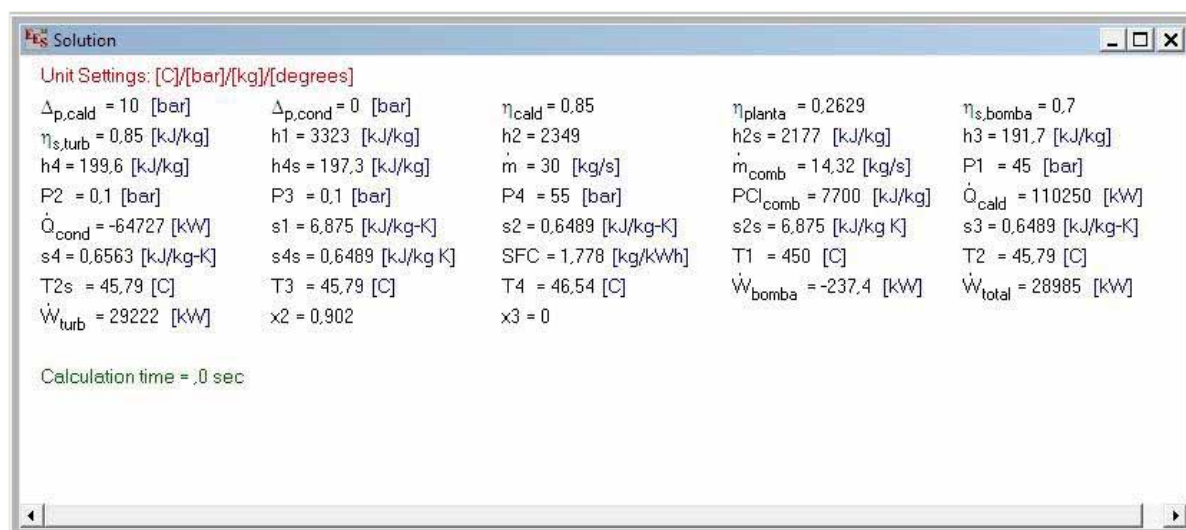
"Ciclo"

```

W_dot_total = W_dot_turb + W_dot_bomba    "[kW]"
eta_planta = W_dot_total/Q_dot_cald
"consumo específico de combustível da planta"
SFC = m_dot_comb*3600/W_dot_total    "[kg/kWh]"

```

Figura 32 - Tela de resultados para ciclo de geração resolvido pelo EES.



Fonte: Elaboração do autor através do programa EES.

Tabela 6 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa EES.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.323	6,875
02	30	0,1	45,79	2.349	7,412
03	30	0,1	45,79	191,70	0,648
04	30	55	46,54	199,60	0,656

Fonte: Elaboração do autor.

6.4.2 Simulação da planta de cogeração com o programa EES

A seguir é apresentado o equacionamento da planta de cogeração para resolução no aplicativo EES, a Figura 33 e a Tabela 7 mostram os resultados obtidos.

"Pressão em bar, temperatura em °C, vazão em kg/s, entalpia em kJ/kg, entropia em kJ/kg K, potencia em kW"

"Propriedades na saída da caldeira"

```
m_dot_1 = 30 "[kg/s]"
T1 = 450 "[C]"
P1 = 45 "[bar]"
h1 = ENTHALPY(Steam;T=T1;P=P1)
s1 = ENTROPY(Steam;T=T1;P=P1)
```

"Turbina 1"

```
P2 = 2,5 "[bar]"
s2s = s1 "[kJ/kg K]"
T2s = TEMPERATURE(Steam;s=s2s;P=P2)
h2s = ENTHALPY(Steam;s=s2s;P=P2)
```

"Determinação da entalpia h2"

```
eta_s_turb_1 = (h1-h2)/(h1-h2s)
eta_s_turb_1 = 0,8
W_dot_turb_1 = m_dot_1*(h1-h2) "[kW]"
T2 = TEMPERATURE(Steam;h=h2;P=P2)
S2 = ENTROPY(steam;h=h2;p=p2)
m_dot_2 = m_dot_1
```

"Bifurcação (splitter)"

```
m_dot_3 = 20
m_dot_2 = m_dot_3 + m_dot_4
T3 = T2
T4 = T2
P3 = P2
P4 = P2
h3 = ENTHALPY(Steam;T=T3;P=P3)
s3 = ENTROPY(Steam;T=T3;P=P3)
h4 = ENTHALPY(Steam;T=T4;P=P4)
s4 = ENTROPY(Steam;T=T4;P=P4)
```

"Turbina 2"

```
P5 = 0,1 "[bar]"
s5s = s4 "[kJ/kg K]"
T5s = TEMPERATURE(Steam;s=s5s;P=P5)
h5s = ENTHALPY(Steam;s=s5s;P=P5)
```

"Determinação da entalpia h5"

```
eta_s_turb_2 = (h4-h5)/(h4-h5s)
eta_s_turb_2 = 0,8
W_dot_turb_2 = m_dot_3*(h4-h5) "[kW]"
T5 = TEMPERATURE(Steam;h=h5;P=P5)
S5 = ENTROPY(Steam;h=h5;p=p5)
x5 = QUALITY(Steam;h=h5;P=P5)
m_dot_5 = m_dot_4
```

"Condensador"

```

DELTA_p_cond = 0,0 "[bar]"
P6 = P5 - DELTA_p_cond "[bar]"
x6 = 0,0
T6 = TEMPERATURE(Steam;x=x6;P=P6)
h6 = ENTHALPY(Steam;x=x6;P=P6)
s6 = ENTROPY(Steam;x=x6;P=P6)
Q_dot_cond = m_dot_5*(h6-h5) "[kW]"
m_dot_6 = m_dot_5

```

"Bomba 1"

```

P7 = 2,5 "[bar]"
s7s = s6 "[kJ/kg K]"
h7s = ENTHALPY(Steam;s=s7s;P=P7)
eta_s_bomba_1 = 0,7

```

"Determinação da entalpia h7"

```

h7 = h6 - (1/eta_s_bomba_1)*(h6-h7s) "[kJ/kg]"
W_dot_bomba_1 = m_dot_6*(h6-h7) "[kW]"
T7 = TEMPERATURE(Steam;h=h7;P=P7)
S7 = ENTROPY(Steam;h=h7;p=p7)
m_dot_7 = m_dot_6

```

"Processo"

```

DELTA_p_proc = 0,0 "[bar]"
P8 = P3 - DELTA_p_proc "[bar]"
x8 = 0,0
T8 = TEMPERATURE(Steam;x=x8;P=P8)
h8 = ENTHALPY(Steam;x=x8;P=P8)
s8 = ENTROPY(Steam;x=x8;P=P8)

Q_dot_proc = m_dot_3*(h8-h3) "[kW]"
m_dot_8 = m_dot_3

```

"Misturador"

```

m_dot_9 = m_dot_7 + m_dot_8
h9 = (m_dot_8*h8 + m_dot_7*h7)/m_dot_9
P9 = P8
T9 = TEMPERATURE(Steam;h=h9;P=P9)
s9 = ENTROPY(Steam;h=h9;P=P9)

```

"Bomba 2"

```

P10 = 55 "[bar]"
s10s = s9 "[kJ/kg K]"
h10s = ENTHALPY(Steam;s=s10s;P=P10)
eta_s_bomba_2 = 0,7

```

"Determinação da entalpia h10"

```

h10 = h9 - (1/eta_s_bomba_2)*(h9-h10s) "[kJ/kg]"
W_dot_bomba_2 = m_dot_9*(h9-h10) "[kW]"
T10 = TEMPERATURE(Steam;h=h10;P=P10)
S10 = ENTROPY(Steam;h=h10;p=p10)
m_dot_10 = m_dot_9

```

"Caldeira"

```

DELTA_p_cald = P10 - P1 "[bar]"
eta_cald = 0,8
Q_dot_cald = (1/eta_cald)*m_dot_1*(h1-h10) "[kW]"

```

```

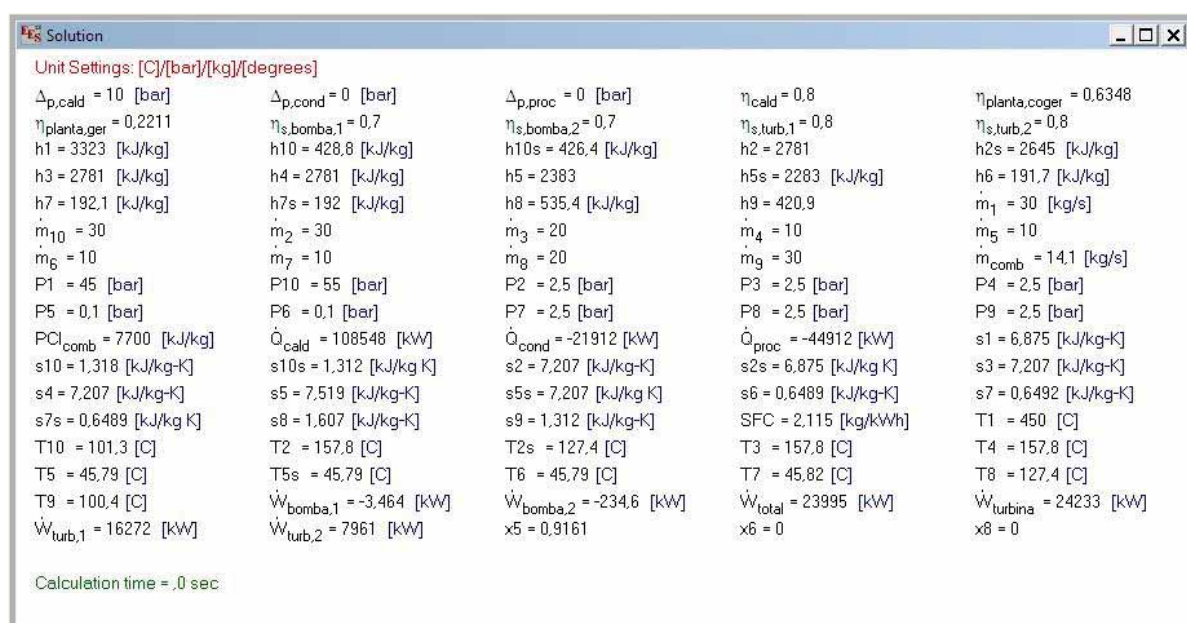
PCI_comb = 7700 "[kJ/kg]"
m_dot_comb = Q_dot_cald/PCI_comb "[kg/s]"

"Ciclo"
W_dot_turbina = W_dot_turb_1 + W_dot_turb_2
W_dot_total = W_dot_turbina + W_dot_bomba_1 + W_dot_bomba_2 "[kW]"
eta_planta_ger = W_dot_total/Q_dot_cald
eta_planta_coger = (W_dot_total - Q_dot_proc)/Q_dot_cald

"Consumo específico de combustível da planta"
SFC = m_dot_comb*3600/W_dot_total "[kg/kWh]"

```

Figura 33 - Planta de cogeração resolvida no EES.



Fonte: Elaboração do autor através do programa EES.

Tabela 7 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa EES.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.323	6,875
02	30	2,5	157,8	2.781	7,207
03	20	2,5	157,8	2.781	7,207
04	10	2,5	157,8	2.781	7,207
05	10	0,1	45,79	2.383	7,519
06	10	0,1	45,79	191,7	0,648
07	10	2,5	45,82	192,0	0,649
08	20	2,5	127,4	535,4	1,607
09	30	2,45	100,4	420,9	1,312
10	30	55	101,3	428,8	1,318

Fonte: Elaboração do autor.

6.5 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O PROGRAMA TPPS

6.5.1 Simulação da planta de geração com o programa TPPS

A seguir é apresentado o equacionamento da planta de geração para resolução no programa desenvolvido no NUPLEN (TPPS), a Figura 34 e a Tabela 8 mostram os resultados obtidos.

Definição das variáveis para cálculo

t1=450	s4s
p1=45	h4s
m_dot=30	s3
h1	eta_s_bomba=0,7
s1	h4
p2=0,1	constante_um=1
s2s	w_dot_bomba
t2s	t4
h2s	delta_p_cald
s2	eta_cald=0,85
eta_s_turb=0,85	q_dot_cald
h2	pci_comb=7700
negativo=-1	m_dot_comb
w_dot_turb	w_dot_total
t2	eta_planta
x2	sfc
delta_p_cond=0	constante_sfc=3600
p3	s4
x3	
t3	
h3	
q_dot_cond	
p4=55	

Equacionamento

```
-- Propriedades na saída da caldeira
h1=TERMO(H('Pt',p1,t1))
s1=TERMO(S('pt',p1,t1))

-- Calculo para Turbina
s2s=s1
t2s=TERMO(T('ps',p2,s2s))
h2s=TERMO(H('ps',p2,s2s))

-- Determinacao da Entalpia H2
h2=(eta_s_turb*(h1-h2s)-h1)*negativo
w_dot_turb=m_dot*(h1-h2)
t2=TERMO(T('PH',p2,h2))
s2=TERMO(S('ph',p2,h2))
x2=TERMO(X('PH',p2,h2))

-- Calculo condensador
p3=p2-delta_p_cond
t3=TERMO(T('Px',p3,x3))
h3=TERMO(H('Px',p3,x3))
s3=TERMO(S('px',p3,x3))
q_dot_cond=m_dot*(h3-h2)
```

```

-- Calculo bomba
s4s=s3
h4s=TERMO(H('Ps',p4,s4s))

-- Calculo Entalpia H4
h4=h3-(contante_um/eta_s_bomba)*(h3-h4s)
w_dot_bomba=m_dot*(h3-h4)
t4=TERMO(T('PH',p4,h4))
s4=TERMO(S('ph',p4,h4))

-- Calculo Caldeira
delta_p_cald=p4-p1
q_dot_cald=(contante_um/eta_cald)*m_dot*(h1-h4)
m_dot_comb=q_dot_cald/pci_comb

-- Valores do ciclo
w_dot_total=w_dot_turb+w_dot_bomba
eta_planta=w_dot_total/q_dot_cald
sfc=m_dot_comb*constante_sfc/w_dot_total

```

Figura 34 - Planta de geração resolvida pelo programa TPPS.



Titulo	Massa	Pressão	Temp. °C	Entalpia	Entropia
PT	30	45	450	3324,049	6,877
PT	30	0,1	45,808	2350,008	7,416
PT	30	0,1	45,808	191,812	0,649
PT	30	55	46,559	199,726	0,657
	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Tabela 8 - Resultados obtidos para a planta de geração com o programa TPPS.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.324,0	6,877
02	30	0,1	45,79	2.350,0	7,416
03	30	0,1	45,79	191,81	0,649
04	30	55	46,54	199,72	0,657

Fonte: Elaboração do autor.

6.5.2 Simulação da planta de cogeração com o programa TPPS

A seguir é apresentado o equacionamento da planta de cogeração para resolução no protótipo desenvolvido pelo NUPLEN (TPPS), a Figura 35 e a Tabela 9 mostram os resultados obtidos.

Definição das variáveis para cálculo

contante_1=1	h4=0	W_DOT_BOMBA_1=0	s10=0
m_dot_1=30	s4=0	m_dot_4=0	m_dot_10=0
m_dot_3=20	S5S=0	M_DOT_6=0	q_dot_cald=0
m_dot_2=0	T5S=0	M_DOT_5=0	pci_comb=7700
q_dot_proc=0	H5S=0	T7=0	m_dot_comb=0
T1=450	P5=0,1	S7=0	w_dot_turbina=0
h1	eta_s_turb_2=0,8	M_DOT_7=0	w_dot_total=0
s1	T5=0	DELTA_p_proc=0	eta_planta_ger=0
s2s=0	S5=0	x8=0,0	eta_planta_coger=0
t2s=0	X5=0	P8=0	sfc=0
h2s=0	H5=0	H8=0	s8=0
h2=0	DELTA_p_cond=0,0	T8=0	w_dot_turb_1=0
P1=45	Delta_p_cald=0	m_dot_8=0	w_dot_turb_2=0
P2=2,5	eta_cald=0,8	M_dot_9=0	
S2=0	x6=0,0	h9=0	
T2=0	T6=0	p9=0	
eta_s_turb_1=0,8	H6=0	t9=0	
m_dot_2=0	S6=0	s9=0	
w_dot_turb_1	P6=0	p10=55	
NEGATIVO=-1	P7=2,5	S10S=0	
t3=0	S7S=0	H10S=0	
p3=0	H7S=0	h10=0	
h3=0	ETA_BOMBA_1=0,7	eta_s_bomba_2=0,7	
s3=0	H7=0	t10=0	
p4=0			
t4=0			

Equacionamento

```

h1=TERMO(h('Pt',P1,T1))
s1=TERMO(s('Pt',P1,T1))

s2s=s1
t2s=TERMO(T('PS',p2,s2s))
h2s=TERMO(H('PS',p2,S2s))
h2=(eta_s_turb_1*(h1-h2s)-h1)*negativo

W_dot_turb_1=m_dot_1*(h1-h2)
T2=TERMO(T('ph',p2,h2))
S2=TERMO(S('PH',p2,h2))
m_dot_2=m_dot_1
m_dot_4=m_dot_2-m_dot_3
T3=T2
T4=T2
P3=P2
P4=P2
h3=TERMO(H('pt',P3,t3))
s3=TERMO(s('pt',p3,t3))
h4=TERMO(h('pt',p4,t4))
s4=TERMO(s('pt',p4,t4))

```

```

s5s=s4
T5s=TERMO(t('ps',p5,s5s))
h5s=TERMO(H('PS',P5,S5S))
h5=(eta_s_turb_2*(h4-H5s)-h4)*negativo

W_dot_turb_2=m_dot_3*(h4-h5)
T5=TERMO(T('PH',P5,H5))
S5=TERMO(S('PH',P5,H5))
x5=TERMO(X('PH',P5,H5))
m_dot_5=m_dot_4

P6=P5-DELTA_p_cond
T6=TERMO(T('PX',P6,X6))
h6=TERMO(H('PX',P6,X6))
s6=TERMO(S('PX',P6,X6))
Q_dot_cond=m_dot_5*(h6-h5)
m_dot_6=m_dot_5

s7s=s6
h7s=TERMO(H('PS',P7,S7S))

h7=h6-(1/eta_s_bomba_1)*(h6-h7s)
W_dot_bomba_1=m_dot_6*(h6-h7)
T7=TERMO(T('PH',P7,H7))
S7=TERMO(S('PH',P7,H7))
m_dot_7=m_dot_6

P8=P3-DELTA_p_proc
T8=TERMO(T('px',p8,x8))
h8=TERMO(H('px',p8,x8))
s8=TERMO(S('PX',P8,X8))

Q_dot_proc=m_dot_3*(h8-h3)
m_dot_8=m_dot_3
m_dot_9=m_dot_7+m_dot_8
h9=(m_dot_8*h8 + m_dot_7*h7)/m_dot_9
P9=P8
T9=TERMO(T('PH',P9,H9))
s9=TERMO(S('PH',P9,H9))

s10s=s9
h10s=TERMO(H('PS',P10,S10S))

h10=h9-(contante_1/eta_s_bomba_2)*(h9-h10s)
W_dot_bomba_2=m_dot_9*(h9-h10)
T10=termo(t('ph',p10,h10))
S10=termo(s('ph',p10,h10))
m_dot_10=m_dot_9

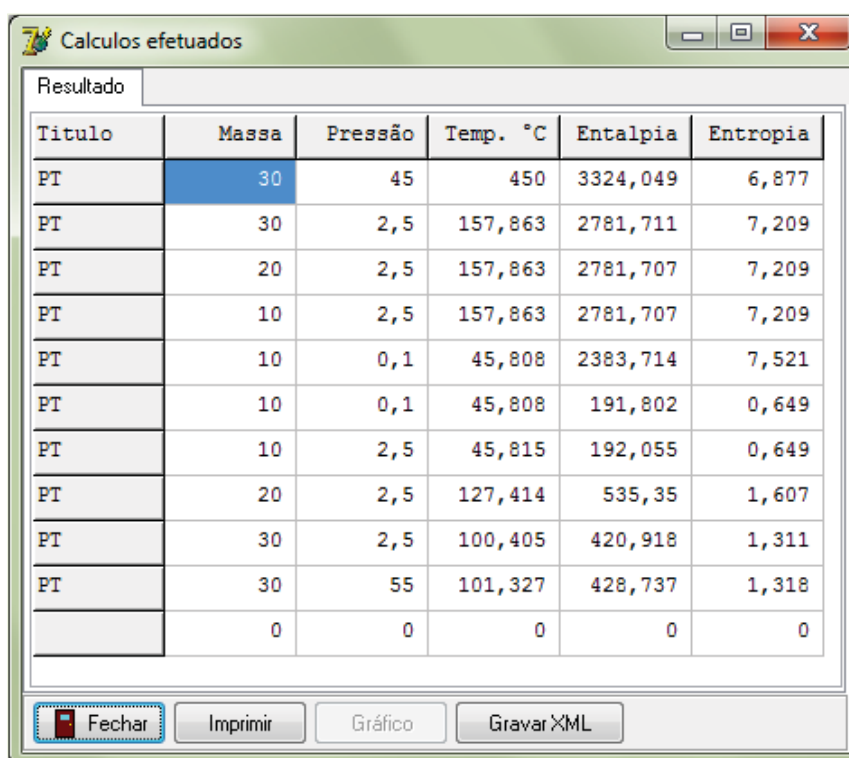
DELTA_p_cald=P10 - P1
Q_dot_cald=(constante-1/eta_cald)*m_dot_1*(h1-h10)
m_dot_comb=Q_dot_cald/PCI_comb

W_dot_turbina=W_dot_turb_1+W_dot_turb_2
W_dot_total=W_dot_turbina+W_dot_bomba_1+W_dot_bomba_2
eta_planta_ger=W_dot_total/Q_dot_cald
eta_planta_coger=(W_dot_total - Q_dot_proc)/Q_dot_cald

SFC=m_dot_comb*3600/W_dot_total

```

Figura 35 - Planta de cogeração resolvida pelo programa TPPS.



Titulo	Massa	Pressão	Temp. °C	Entalpia	Entropia
PT	30	45	450	3324,049	6,877
PT	30	2,5	157,863	2781,711	7,209
PT	20	2,5	157,863	2781,707	7,209
PT	10	2,5	157,863	2781,707	7,209
PT	10	0,1	45,808	2383,714	7,521
PT	10	0,1	45,808	191,802	0,649
PT	10	2,5	45,815	192,055	0,649
PT	20	2,5	127,414	535,35	1,607
PT	30	2,5	100,405	420,918	1,311
PT	30	55	101,327	428,737	1,318
	0	0	0	0	0

Fechar Imprimir Gráfico Gravar XML

Fonte: Elaboração do autor através do programa TPPS.

Tabela 9 - Resultados obtidos para a planta de cogeração com o programa TPPS.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg K)
01	30	45	450	3.324,04	6,877
02	30	2,5	157,863	2.781,71	7,209
03	20	2,5	157,863	2.781,70	7,209
04	10	2,5	157,863	2.781,70	7,209
05	10	0,1	45,808	2.383,71	7,521
06	10	0,1	45,808	191,802	0,649
07	10	2,5	45,815	192,055	0,649
08	20	2,5	127,414	535,35	1,607
09	30	2,45	100,405	420,918	1,311
10	30	55	101,327	428,737	1,318

Fonte: Elaboração do autor.

6.6 RESULTADOS COMPARATIVOS DAS SIMULAÇÕES DA PLANTA DE GERAÇÃO

As Tabelas 10, 11 e 12 mostram, respectivamente, os comparativos de Temperatura, Entalpia e Entropia entre os programas comerciais e o programa desenvolvido, para o caso da planta de geração.

Tabela 10 - Comparativo da temperatura para a planta de geração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	450	450	450	450
02	30	0,1	45,81	45,79	45,81	45,80
03	30	0,1	45,81	45,79	45,81	45,80
04	30	55	46,44	46,54	46,43	46,55

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 11 - Comparativo da entalpia para a planta de geração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Entalpia (kJ/kg)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	3.324	3.323	3.324,05	3.324,0
02	30	0,1	2.350	2.349	2.415	2.350,0
03	30	0,1	191,81	191,70	191,81	191,81
04	30	55	199,20	199,60	199,20	199,72

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 12 - Comparativo da entropia para a planta de geração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Entropia (kJ/kgK)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	6,8767	6,8750	6,9070	6,8770
02	30	0,1	7,4150	7,4120	7,6960	7,4159
03	30	0,1	0,6386	0,6489	0,6490	0,6490
04	30	55	0,6551	0,6563	0,6550	0,6570

Fonte: Elaboração do autor.

6.7 RESULTADOS COMPARATIVOS DAS SIMULAÇÕES DA PLANTA DE COGERAÇÃO

As Tabelas 13, 14 e 15 mostram, respectivamente, os comparativos de Temperatura, Entalpia e Entropia entre os programas comerciais e o programa desenvolvido, para o caso da planta de cogeração.

Tabela 13 - Comparativo da temperatura para a planta de cogeração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	450	450	450	450
02	30	2,5	162,54	157,8	162,54	157,86
03	20	2,5	162,54	157,8	162,54	157,86
04	10	2,5	162,54	157,8	162,54	157,86
05	10	0,1	45,81	45,79	45,81	45,80
06	10	0,1	45,81	45,79	45,81	45,80
07	10	2,5	45,83	45,82	45,83	45,81
08	20	2,5	127,41	127,4	127,41	127,41
09	30	2,45	100,41	100,4	100,41	100,40
10	30	55	101,21	101,3	101,21	101,32

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 14 - Comparativo da entalpia para a planta de cogeração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Entalpia (kJ/kg)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	3.344,0	3.323	3.324,0	3.324,0
02	30	2,5	2.781,7	2.781	2.791,4	2.781,7
03	20	2,5	2.781,7	2.781	2.791,4	2.781,7
04	10	2,5	2.781,7	2.781	2.791,4	2.781,7
05	10	0,1	2.383,7	2.383	2.391,4	2.383,7
06	10	0,1	191,81	191,7	191,8	191,80
07	10	2,5	192,13	192,0	192,1	192,05
08	20	2,5	535,35	535,4	535,3	535,35
09	30	2.45	420,94	420,9	420,9	420,91
10	30	55	428,79	428,8	428,2	428,73

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 15 - Comparativo da entropia para a planta de cogeração.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Entropia (kJ/kg K)			
			IPSEpro	EES	Cycle-Tempo	TPPS
01	30	45	6,876	6,875	6,876	6,876
02	30	2,5	7,209	7,207	7,231	7,209
03	20	2,5	7,209	7,207	7,231	7,209
04	10	2,5	7,209	7,207	7,231	7,209
05	10	0,1	7,521	7,519	7,545	7,531
06	10	0,1	0,649	0,648	0,649	0,649
07	10	2,5	0,649	0,649	0,649	0,649
08	20	2,5	1,607	1,607	1,607	1,602
09	30	2,5	1,311	1,312	1,311	1,311
10	30	55	1,317	1,318	1,316	1,317

Fonte: Elaboração do autor.

7 RESOLUÇÃO DE UMA PLANTA TÉRMICA E DE POTÊNCIA COMPLEXA

Nesta seção é definida uma planta térmica e de potência mais complexa para a resolução com o programa TPPS e posterior comparação com a solução através do programa MATLAB. Os equacionamentos do problema no MATLAB e no TPPS podem ser vistos no Apêndice C.

O MATLAB é um programa destinado a fazer cálculos com matrizes (MATLAB = MATrix LABoratory). MATLAB foi criada no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, então presidente do departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México. Ela logo se espalhou para outras universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade matemática aplicada. Jack Little, um engenheiro, conheceu a linguagem MATLAB durante uma visita feita por Moler a Universidade de Stanford em 1983. Reconhecendo o seu potencial comercial, ele juntou-se a Moler e Steve Bangert. Eles reescreveram MATLAB em C e em 1984 fundaram a MathWorks e prosseguiram no seu desenvolvimento. As bibliotecas reescritas ficaram conhecidas como LAPACK.

MATLAB foi adotado pela primeira vez por engenheiros de projeto de controle, a especialidade de Little, e rapidamente se espalhou para outros campos de aplicação. Agora é também utilizado nas áreas da educação, em especial o ensino da álgebra linear e análise numérica, e é muito popular entre os cientistas envolvidos com o processamento de imagem.

7.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA A SER RESOLVIDO

O problema a ser resolvido trata-se de uma usina de potência de ciclos combinados, sendo ilustrada na Figura 36. São duas unidades Brayton (CB) fechadas, para uma Rankine (CR). O fluido de trabalho nos ciclos Brayton é gás hélio aquecido por combustão externa e a potência elétrica gerada pelas duas turbinas a gás deverá ser de 200 MW. As eficiências dos geradores elétricos são 96%.

Os seguintes parâmetros são especificados para o ciclo Brayton: $c_p = 5.195 \text{ J/kgK}$; $\gamma = 1,667$; $T_{min} = 300 \text{ K}$; $p_{min} = 100 \text{ kPa}$; $T_{max} = 1.379,1 \text{ K}$; razão de compressão igual a 10; perdas de pressão de 3% na câmara de combustão (CC), 5% na caldeira de recuperação (HRSG), 3% no regenerador e 3% no resfriador de hélio; temperatura do He na saída da HRSG $T_7 = (T_{sat} + 20K) - [T_4 - (T_{sat} + 20K)](h_l - h_c)/(h_g - h_l)$; eficiências isoentrópicas dos compressores e expansores 88%.

Os seguintes parâmetros são especificados para o ciclo de Rankine: pressão na entrada da turbina, 120 bar; temperatura na entrada da turbina, 520 °C; pressão no condensador, 20,998 kPa; temperatura do líquido na saída do aquecedor de água de alimentação, $T_{13} = T_{sat,p_{min}} + 0,47(T_{sat,p_{max}} - T_{sat,p_{min}})$; eficiências isentrópicas das turbinas a vapor e das bombas de alimentação, 85 e 80%, respectivamente; aumento de temperatura da água de refrigeração no condensador, 20 °C.

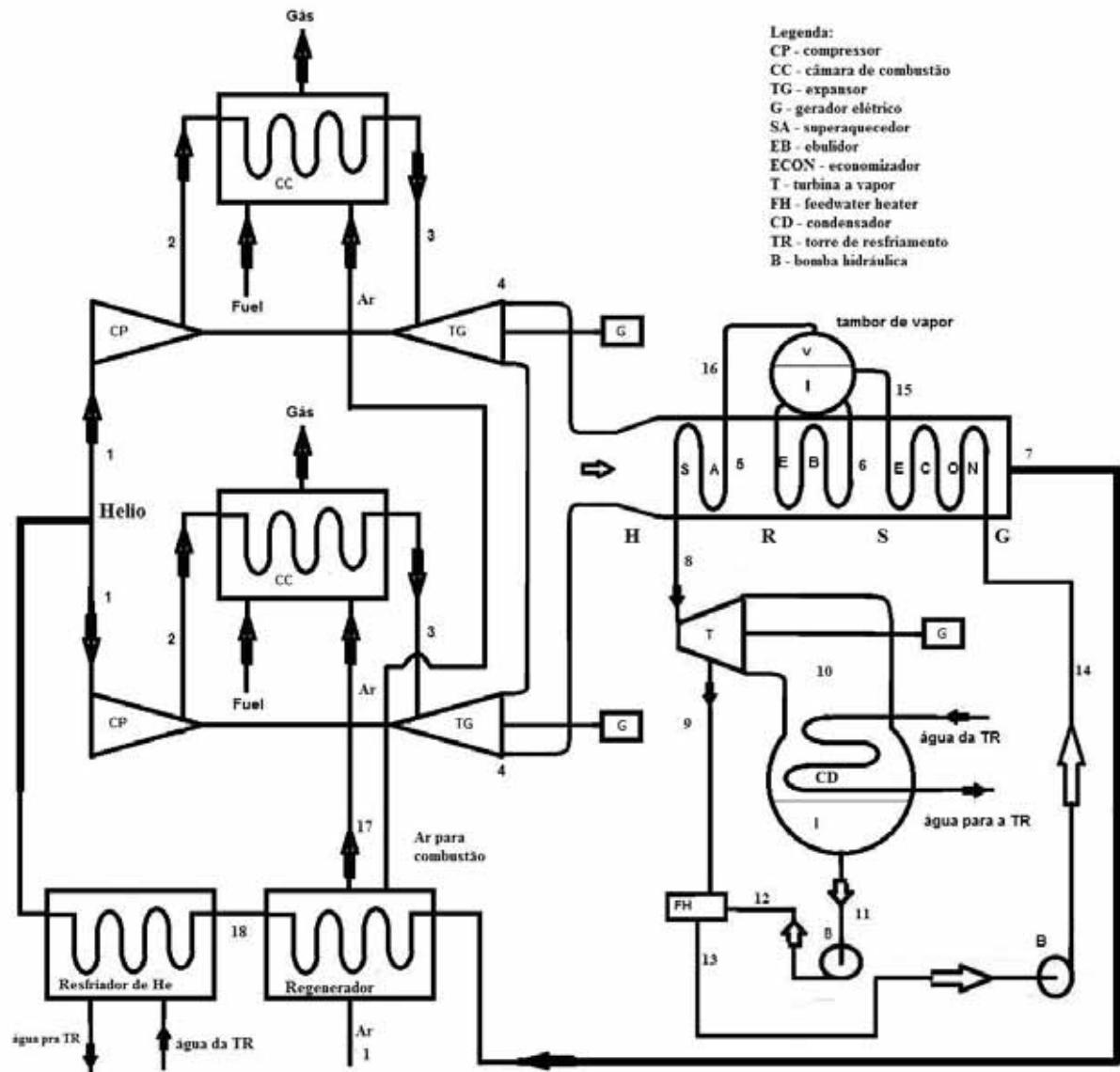
Na câmara de combustão os seguintes dados são fornecidos: razão combustível-ar, $F = 0,02627$; temperatura dos produtos na entrada do trocador de calor, 1.520 K; temperatura dos produtos na saída do trocador de calor, 670 K; calor específico dos produtos, $c_p = 1.309,6$ J/kgK; o ar da combustão é pré-aquecido no regenerador a 519,75 K.

Determine:

- a) A vazão mássica de hélio para cada Ciclo Brayton (CB);
- b) A vazão mássica de vapor em t/h e potência elétrica do Ciclo Rankine (CR);
- c) A eficiência térmica do ciclo combinado;
- d) As taxas de massa de combustível e ar na câmara de combustão (CC);
- e) A taxa de transferência de calor na caldeira de recuperação (HRSG), em MW;
- f) As vazões volumétricas de água de refrigeração no condensador resfriador de He;
- g) As taxas de vapor (SR) e de calor (HR) no Ciclo Rankine;
- h) As razões dos trabalhos dos compressores e das bombas para os trabalhos das turbinas;
- i) A razão do calor rejeitado para o calor adicionado;
- j) As eficiências da segunda lei do ciclo e exergética da usina, se a fonte de calor está a 1.520 K e o sumidouro de calor está a 300 K.

Observação: T_{sat} é a temperatura de saturação na pressão máxima do Ciclo Rankine; h_l é a entalpia de líquido saturado a T_{sat} ; h_c é a entalpia do líquido na entrada do economizador e $h_{g\theta}$ é entalpia do vapor na saída do superaquecedor.

Figura 36 - Planta de potência complexa.



Fonte: Campos Silva (2012).

7.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS PROGRAMAS MATLAB E TPPS

Na Tabela 16 são mostrados os valores obtidos para as principais variáveis da planta de potência complexa (Figura 42), com a resolução do problema pelos programas MATLAB e TPPS, bem como a diferença relativa entre as soluções obtidas por cada um dos programas.

Tabela 16 - Comparativo de resultados do MATLAB e TPPS para uma planta complexa.

Variável	MATLAB	TPPS	Unidade	Diferença Relativa
WCB	200	200	MW	
WTV	33,421	33,379	MW	0,12
WB1	0,038	0,034	MW	11,02
WB	0,532	0,533	MW	0,18
WCR	31,534	31,491	MW	0,14
WC	-575,810	-575,810	MW	0,00
WTG	784,143	784,143	MW	0,00
Wplanta	231,534	231,491	MW	0,02
EdC	26,429	26,429	MW	0,00
EdC2	13,214	13,214	MW	0,00
EdCC	55,843	55,843	MW	0,00
EdCC2	27,921	27,921	MW	0,00
EdTG	51,100	51,100	MW	0,00
EdTG2	25,549	25,549	MW	0,00
EdHRSG	9,72	9,72	MW	0,00
EdRG	27,76	27,76	MW	0,00
EdRE	48,73	48,73	MW	0,00
EdTV	4,392	4,421	MW	0,67
EdCD	5,88	5,88	MW	0,00
EdB1	0,006	0,003	MW	50
EdFH	1,590	1,700	MW	6,34
EdB	0,0124	0,0114	MW	8,06
Edt	231,45	231,54	MW	0,04
wC	- 2.678.814,35	- 2.678.814,35	V	0,00
wTG	3.648.033,93	3.648.033,93	V	0,00
wCB	969.219,57	969.219,57	V	0,00
wTV	964.702,09	964.527,03	V	0,02
wB1	1.120,46	998,26	V	10,91
wB	15.365,75	15.421,77	V	0,36
wCR	910.287,25	834.334,16	V	8,34
Qin	629,181	629,181	MW	0,00
Qin2	314,6	314,6	MW	0,00
QinCR	90,8	90,8	MW	0,00
QinCR1	90,08	90,05	MW	0,01
QoutCR	57,23	57,24	MW	0,01
QoutCB	209,14	209,16	MW	0,01
Qout	266,4	266,4	MW	0,00
Qinar	121,6	121,6	MW	0,00
Qindice	0,42	0,42		0,00
Qgeral	629,2	629,2	MW	0,00
IC	26,43	26,43	MW	0,00
IC2	13,215	13,215	MW	0,00
ICC	55,84	55,84	MW	0,00
ICC2	27,92	27,92	MW	0,00
ITG	51,1	51,1	MW	0,00
ITG2	25,55	25,55	MW	0,00
IHRSG	9,72	9,72	MW	0,43
IRG	27,755	27,755	MW	0,00
IRE	48,725	48,735	MW	0,02
ITV	4,4	4,4	MW	0,67
ICD	5,88	5,72	MW	2,69
IFH	1,6	1,6	MW	0,00
IB1	0,006	0,006	MW	0,00
IB	0,0125	0,0134	MW	7,35
I	231,45	231,3	MW	0,08

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados apresentados podem ser considerados bons uma vez que as diferenças apresentadas foram muito pequenas, mesmo sabendo que os programas utilizam tabelas de propriedades diferentes para o cálculo das propriedades termodinâmicas. Obviamente que para valores menores as diferenças tendem a ser mais expressivas.

8 CONCLUSÕES

O principal objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para simulação de plantas térmicas e de potência, tendo como base alguns programas utilizados no meio acadêmico e profissional. Por meio do estudo dessas ferramentas, suas características e funcionalidades, assim como observando as dificuldades e facilidades de utilização de cada um dos programas, foi possível o desenvolvimento do protótipo de uma ferramenta de baixo custo para resolução de problemas termodinâmicos, a qual poderá ser utilizada em sala de aula pelo alunos na criação e equacionamento de novos componentes, e, também, para resolução de problemas termodinâmicos através de cálculos e fórmulas definidas pelo usuário.

Os resultados obtidos nos comparativos dos cálculos do protótipo desenvolvido com alguns programas atualmente em uso no meio acadêmico foram bastante satisfatórios com diferenças muito pequenas, na maioria dos problemas resolvidos. O comparativo com o programa MATLAB também obteve valores bem próximos para o cálculo da planta de potência, a maioria com valores iguais, apesar de algumas propriedades termodinâmicas serem calculadas com valores aproximados, essas diferenças não afetaram os resultados de variáveis de maior valor numérico. O TPPS possui dois tipos de resolução para um problema, a resolução em tela gráfica, a qual é parcialmente limitada na versão atual e deverá ser acrescida de novos recursos em trabalhos futuros; e a tela de equacionamentos, na qual os cálculos são mais precisos em virtude do usuário ter um maior controle sobre o problema estudado uma vez que o próprio usuário define o equacionamento e o programa resolve as fórmulas definidas.

Um dos principais pontos da análise foi criar uma ferramenta que não limitasse o usuário e isso foi conseguido, pois o programa não funciona como uma caixa preta, pelo contrário, o usuário tem acesso aos equacionamentos de cada equipamento, permitindo que o se possa criar algum componente em qualquer programa gráfico, cadastrar o novo componente na base de dados e, para cada componente criado, definir suas entradas e saídas e o equacionamento que será executado quando o componente receber algum valor em suas entradas, com este recurso o programa permite que inúmeras bibliotecas possam ser criadas para o mesmo.

Na parte de equacionamento, o programa também permite a filtragem e localização automática de variáveis, sendo que com apenas alguns cliques o usuário sabe onde a variável foi declarada e em qual fórmula a mesma está sendo utilizada.

O trabalho foi desenvolvido de forma que poderá ser enriquecido, abrindo caminho para uma segunda versão mais completa e com novos recursos e técnicas de cálculos.

Esta ferramenta pode ser de grande auxílio a estudantes de graduação no ensino de Termodinâmica, uma vez que permite ao aluno criar sua própria biblioteca de aparatos.

Um ponto importante na concepção do trabalho foi a utilização da biblioteca FLUIDPROP para cálculo de propriedades termodinâmicas, a qual não estava preparada para trabalhar com a linguagem escolhida. Como resultado, foi enviado a seus criadores exemplos de como trabalhar utilizando a mesma plataforma, os quais se tornaram gratos e ficaram de incorporar em futuras versões do programa essa possibilidade.

Outro ponto a ser destacado foi o desenvolvimento de um *parse* para resolução das fórmulas informadas pelo usuário, este *parse* possui um interpretador que faz a leitura de um arquivo texto puro sem formatação, obtendo uma fórmula por vez, a qual é analisada. Em seguida separam-se as variáveis e obtêm-se os valores de cada uma e, posteriormente, após analisar a sintaxe da fórmula, a transforma em uma fórmula que o computador possa resolver utilizando a técnica de empilhamento.

A área de termodinâmica é uma área muito ampla, difícil e com muitas variantes, por isso o trabalho desenvolvido teve várias dificuldades, pois o campo estudado é muito vasto e abre um leque muito grande de opções a serem tratadas dentro de um programa, muitas vezes necessitando do conhecimento técnico muito profundo de profissionais de áreas específicas, sendo esta a maior dificuldade encontrada.

Como sugestão para continuação deste trabalho, o principal agora seria a criação de uma biblioteca de equipamentos e a melhoria da parte gráfica, acrescentando novos recursos, como rotação de objetos e relatórios.

REFERÊNCIAS

- AMUNDSEN, R. F. The cogeneration revolution. **Applied Energy**, Kidlington, v. 36, n. 1-2, p. 79-83, 1990.
- ANTUNES, J. S. **Código computacional para análise de cogeração com turbinas a gás**. 1999. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 1999.
- BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração**: geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002. 279 p.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design & optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 542 p.
- CAMPOS SILVA, J. B. C. **Planta de potência**. Ilha Solteira: Unesp/FEIS, 2012. (Prova aplicada pelo Prof. Dr. João Batista Campos Silva aos alunos do 4º ano do Curso de Engenharia Mecânica no ano de 2012).
- COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVAMUTTOO, H. I. H. **Gas turbine theory**. 4. ed. London: Prentice Hall, 1996. 442 p.
- COGEN EUROPE. **Educogen**: an educational tool for cogeneration. 2. ed. Brussels: Belgium, 2001.
- CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- CORRÊA JUNIOR, P. S. P. **O uso do biodiesel em micro-turbinas a gás**: testes de desempenho térmico e emissões. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 2006. 37 p. Apresentação da Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://www.portal.unifei.edu.br/files/arquivos/PRPPG/mecanica/seminarios/O_Uso_do_Bio_diesel_em_Micro_turbinas_a_Gas_Testes_de_Desempenho_Termico_Emissoes.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2012.
- DEL CAMPO, E. R. B. **Avaliação termoeconômica do sistema de cogeração da usina Vale do Rosário**. 1999. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1999.
- DONATELLI, J. L. **Otimização estrutural e paramétrica de sistemas de cogeração utilizando superestruturas**. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- FIOMARI, M. C. **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão**. 2004. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2004.

GALLEGO, A. G. **Modelagem computacional e análise termodinâmica de sistemas de geração de potência utilizando gaseificação de licor negro**. 2004. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Geração de vapor, sistemas de potência, refrigeração e recuperação de calor**. São Paulo: IPT, 1996. Cap. 3, p. 3.2-3.38.

JALURIA, Y. **Design and optimization of thermal systems**. New York: McGraw-Hill, 1998. 626 p.

KEHLHOFER, R. H.; WARNER, J.; NIELSEN, H.; BACHMANN, R. **Combined cycle gas- steam turbine power plants**. Tusla: Pennwell, 1999. 288 p.

KLEIN, S. A.; ALVARADO, F. L. **EES - Engineering Equation Solver**. Middleton: F-Chart Software, 1995.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. Malabar: Krieger, 1985. 328 p.

LAUTMAN, L. **Reliability of natural gas cogeneration systems**. Chicago: Gas Research Institute, 1993.

LISZKA, M.; MANFRIDA, G.; ZIEBIK, A. Parametric study of HRSG in case of repowered industrial CHP plant. **Energy Conversion and Management**, London, v. 44, n. 7, p. 995-1012, 2003.

NARULA, R. G. Salient design considerations for an ideal combined cycle power plant. **Heat Recovery Systems & CHP**, Kidlington, v. 15, n. 2, p. 97-104, 1995.

NICODEMOS, R. M. **Introdução aos simuladores de processos**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2 set. 2011. 29 f. Trabalho apresentado na disciplina Tópicos Especiais em Modelagem, Controle e Otimização II: Projeto Auxiliado por Computador de Processos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/giselerabelo/processo-industrial-de-extraio-dos-leos-do-fruto-da-macaba>>. Acesso em: 15 jun. 2012.

ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I. Residential cogeneration systems: review of the current technology. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 10, n. 5, p. 389-431, 2004.

PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria suco-alcooleira**: estudo de caso. 2003. 282 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2003.

SANTOS, J. P. T. B. **Estudo de sistemas solares térmicos para aplicação à micro-cogeração**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, 2008.

SANTOS, F. E. A. **Desenvolvimento e instalação de um cogrador compacto no Campus da Universidade Federal do Acre**. 2001. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2001.

SANTOS, P. R. **Análise termodinâmica de um sistema de cogeração com gaseificação de licor negro**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2007.

SILVEIRA, J. A.; LACAVA, P. T. Análise exegética de sistema de cogeração aplicado à fabricação de papel e celulose. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE - CEM-NNE, 3., João Pessoa, 1992. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1992.

SILVEIRA, J. L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário**. 1994. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1994.

STOECKER, W. F. **Design of thermal systems**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1989. 565 p.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process**. New York: Hemisphere, 1988. 332 p.

TEIXEIRA, F. N.; NOGUEIRA, L. A. H. **Disseminação de informações em eficiência energética: cogeração**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2004. 74 p.

TAKAKI, A. T. **Análise do aproveitamento do gás natural em plantas de cogeração e trigerção de energia em indústrias frigoríficas**. 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2006.

TOLMASQUIM, M.; SZKLO, A.; SUGIYAMA, A.; SOARES, J.; CORRÊA NETO, V. **Avaliação dos potenciais técnico e econômico e identificação das principais barreiras à implementação da cogeração no Brasil e em setores selecionados**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 594 p.

WALTER, A. C. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucro-alcooleiro**. 1994. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1994.

APÊNDICE A - ASPECTOS GERAIS DA COGERAÇÃO DE ENERGIA

A.1 - DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO

O termo “cogeração” é de origem americana e é empregado para designar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico (AMUNDSEN, 1990).

Normalmente, são usados os Ciclos Rankine, que empregam turbinas a vapor; os Ciclos Brayton, que utilizam turbinas a gás; ou os Ciclos Combinados, que utilizam turbinas a gás e a vapor.

Pelo fato de serem obtidos dois produtos de valores distintos (energia térmica e potência), utilizando uma mesma fonte de energia, os sistemas de cogeração tornam-se atrativos por apresentarem eficiências de primeira lei maiores do que aquelas encontradas quando ambas as formas de energia são produzidas em processos independentes. Estas eficiências podem ser da ordem de 75 a 90 % (WALTER, 1994).

O objetivo da cogeração é produzir eletricidade ou energia mecânica, de modo que a maior parte da energia disponível no combustível seja utilizada, em lugar de somente uma pequena parte, como ocorre em centrais termelétricas devido à ocorrência de maiores irreversibilidades, de modo que o rendimento térmico não supera valores de 40 a 42 % (ONOVWIONA; UGURSAL, 2004).

Segundo Balestieri (2002), esta prática pode ser considerada uma alternativa positiva se comparada ao atual estágio de geração de energia, tal como é concebido o sistema interligado brasileiro, onde as necessidades de energia elétrica são atendidas mediante contrato de compra com uma concessionária, sendo as necessidades térmicas (quentes ou frias) atendidas mediante autoprodução.

A energia elétrica também pode ser autoproduzida, sendo que nestes casos as unidades de geração devem ser dimensionadas para operarem de forma independente das concessionárias, garantindo desta forma a confiabilidade do sistema isolado.

A cogeração é um conceito técnico antigo que atualmente oferece um grande potencial de aplicação, em função da conjugação do progresso que se tem obtido nos mais diversos campos da técnica, da alta eficiência e da alta confiabilidade dos componentes utilizados. Assim, com a crescente busca na melhoria da eficiência, tanto com relação ao desempenho na geração como também no aproveitamento de disponibilidades energéticas residuais, a

cogeração tem sido apontada como uma efetiva alternativa de racionalização energética e econômica. A cogeração é normalmente empregada em processos industriais e nos empreendimentos do setor terciário da economia (hotéis, hospitais, centros comerciais, etc...) que demandam simultaneamente duas ou mais formas de energia (eletricidade, calor e, em alguns casos, frio).

Na maioria dos processos industriais, tais como secagem, cozimento e evaporação, a temperatura necessária está em torno de 150 a 200 °C. Para a produção desta energia térmica são empregados combustíveis cujas temperaturas de chama variam entre 1.400 a 1.800 °C e ocorrem grandes perdas de energia, sendo que, com a utilização da cogeração, tem-se um maior aproveitamento do combustível.

A.2 - HISTÓRICO DA COGERAÇÃO

Embora não seja uma tecnologia nova, haja vista que os primeiros sistemas foram implementados no final do século XIX, a cogeração está presente em várias unidades industriais e comerciais no atual cenário de geração de energia elétrica. Tais sistemas permitem atender parcial ou totalmente às necessidades térmicas e elétricas dos segmentos industrial e comercial.

Em função da expansão dos sistemas elétricos interligados e da interconexão destes com sistemas isolados de geração, a cogeração foi perdendo sua força. Diante dessa situação, de toda a oferta de energia elétrica ao final da década de 60, a cogeração respondia por menos de 5 % nos Estados Unidos e cerca de 15 % na Europa (TEIXEIRA; NOGUEIRA, 2004).

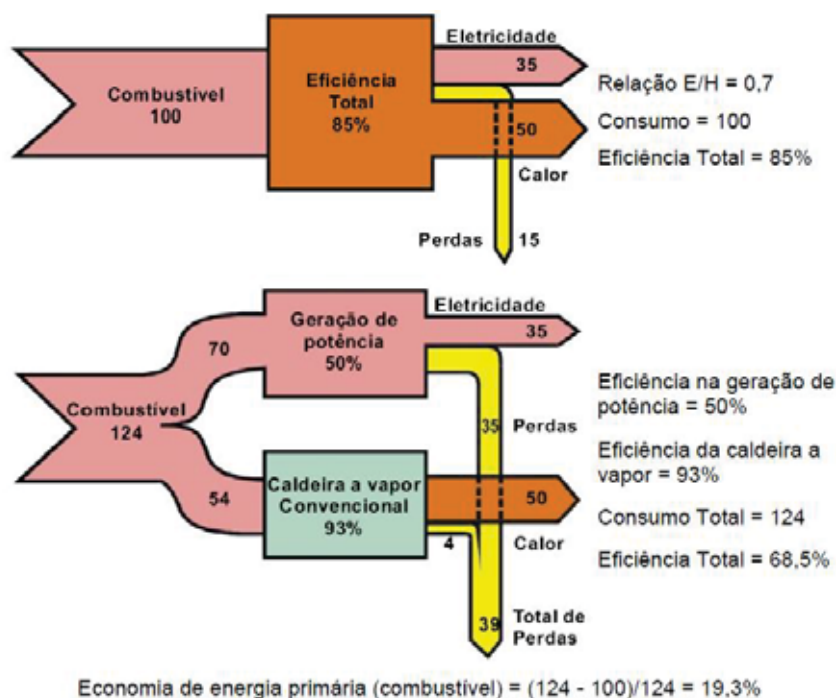
As importantes modificações na disponibilidade e nos custos da energia, que tiveram início a partir de 1973, com o primeiro choque do petróleo, resultaram no incentivo à racionalização do uso da energia e dos combustíveis nobres e nas desregulamentações do setor elétrico de alguns países ao longo das últimas quatro décadas, restabelecendo a importância da tecnologia de cogeração. Nos Estados Unidos, a publicação do PURPA (*Public Utilities Regulatory Policy Act*), em 1978, abriu novos horizontes na indústria de geração, na medida em que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica e rompeu a estrutura verticalmente integrada das concessionárias públicas.

A partir da década de 80, com a elevação dos preços dos combustíveis, a valorização da eficiência energética e a preocupação mundial em relação à conversão energética com menores emissões de CO₂, principalmente devido ao efeito estufa, a cogeração passou a ser, novamente, uma importante alternativa para geração de energia elétrica. A maior

disponibilidade de gás natural nos países industrializados em conjunto com o avanço tecnológico de turbinas a gás e a perda de interesse pela energia nuclear, também tiveram contribuição significativa para o reaparecimento dessa tecnologia.

A Figura 37 apresenta a eficiência total e o ganho de energia primária obtido em sistemas de cogeração em comparação com a produção separada de eletricidade e calor.

Figura 37 - Comparação entre o processo de cogeração de energia e a produção.



Fonte: Takaki (2006).

Os sistemas de cogeração são classificados de acordo com o tipo de máquina térmica que os equipam. Como máquinas térmicas: são usados tradicionalmente, motores alternativos (de explosão – Ciclo Otto ou de compressão interna – Ciclo Diesel) ou turbinas (a gás ou a vapor) e, mais recentemente, microturbinas e células combustíveis.

Regime Bottoming: neste regime, a geração de potência para atender a demanda eletromecânica ocorre após a produção de calor, que é utilizado para suprir a demanda térmica. O sistema de cogeração que opera segundo o regime *bottoming* baseia-se na recuperação do calor rejeitado a altas temperaturas por processos industriais para a geração de vapor, o qual é então expandido em turbinas de condensação e/ou contrapressão, que acionam geradores elétricos ou equipamentos tais como bombas hidráulicas, compressores de ar, etc...

Regime Topping: neste regime, o combustível é queimado primeiramente em uma máquina térmica para geração de energia elétrica e/ou mecânica e, em seguida, se aproveita os

gases de exaustão desta máquina (calor residual) para produção de água quente, vapor de processo (em diferentes níveis de pressão) e ar quente. Assim, em primeiro lugar, gera-se energia elétrica e, depois, a energia contida na exaustão da máquina é transformada em energia térmica, a fim de atender os requisitos térmicos do processo. Como exemplo de planta de cogeração do tipo *topping* pode-se destacar as plantas de potência com turbina a vapor de contrapressão, turbina a vapor de extração-condensação, turbina a gás com caldeira de recuperação, e o ciclo combinado.

A Tabela 17 mostra as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de cogeração disponíveis atualmente em nosso mercado.

Tabela 17 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Tecnologia a gás	Fiabilidade elevada; Emissão de poluentes baixa; Calor a temperatura elevada (500 a 600 °C); Não necessita de refrigeração.	Operação com gás a alta pressão; Rendimento reduzido à carga parcial; Potência de saída diminui com aumento da temperatura ambiente; Ineficiente em processos com poucas necessidades térmicas.
Motores de explosão e motores de compressão interna	Rendimento elétrico elevado; Bom desempenho com carga parcial; Arranque rápido; Energia térmica a dois níveis de temperatura gases de escape e arrefecimento do motor; Manutenção no local com pessoal não especializado; Operação com gás a baixa pressão.	Custo de manutenção elevado; Calor de baixa temperatura; Emissões poluentes relativamente elevadas; Necessita refrigeração; Ruído de baixa frequência.
Turbinas a vapor	Rendimento global elevado; Operação com diversos tipos de combustível; Grandes quantidades de calor disponíveis; Vida útil e confiabilidade elevada; Vapor a alta pressão.	Arranque lento; Rendimento elétrico baixo.
Micro turbinas	Dimensão compacta; Peso reduzido; Baixa emissão de poluentes; Não necessita de refrigeração.	Custos elevados; Calor de baixa temperatura; Tecnologia em maturação.
Célula de combustível	Baixa emissão de poluentes; Ruídos baixo; Não tem peças rotativas; Modularidade.	Custos elevados; Viabilidade incerta; Tecnologia em maturação; Necessidade de pré-processamento do combustível (exceto H ₂ puro).

Fonte: Elaboração do autor.

Um caso particular de cogeração, no qual, a partir do vapor é gerada também a refrigeração, é conhecido com trigeração. Assim, a trigeração de energia pode ser definida como sendo a produção combinada de três formas úteis de energia (eletricidade, calor e frio) a partir de uma única fonte de energia primária.

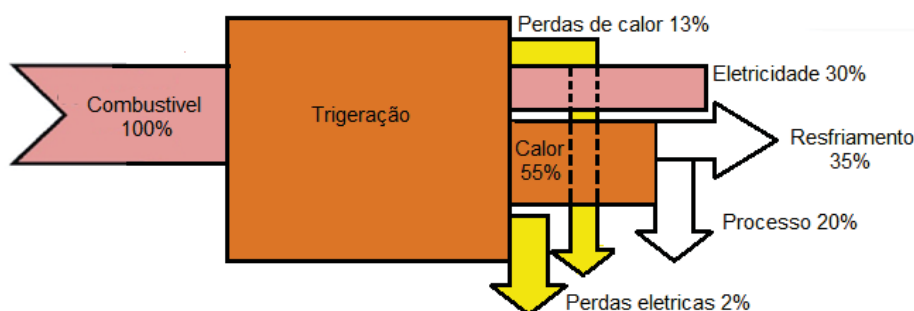
Assim, a trigeração apresenta-se com o objetivo de obter um maior rendimento dos processos de conversão de energia através da redução no consumo de combustíveis, reduzindo também, com os avanços da tecnologia, os impactos ambientais da indústria. Além das vantagens derivadas da cogeração, a trigeração permite uma economia significativa no consumo de potência, contribuindo para a melhoria da eficiência global da planta e para a redução dos impactos ambientais.

Esta nova técnica tem sido até recentemente usada exclusivamente para sistemas de condicionamento de ar. Porém, com o advento das preocupações sobre o ambiente e conservação de energia, as técnicas de trigeração estão se tornando mais populares e se transformando numa potencial solução para uma ampla variedade de aplicações, não só no setor terciário (centros comerciais, hotéis, hospitais, restaurantes, etc...), como também no setor industrial (indústrias químicas, de alimentos, de bebidas, etc...).

As tecnologias mais recentes de trigeração de energia têm privilegiado a utilização de gás natural como combustível, não só devido ao aumento de sua disponibilidade, como também aos seus reduzidos impactos ambientais.

A Figura 38 mostra um diagrama de fluxo de energia, típico de um sistema de trigeração de energia.

Figura 38 - Diagrama de fluxo de energia típico de sistema de trigeração.



Fonte: Adaptado de Takaki (2006).

A.3 - APLICAÇÕES DA COGERAÇÃO

Muitos são os processos que demandam calor a algum nível de temperatura, seja em aplicações industriais ou prediais (incluindo os setores residenciais e comerciais). Nestes casos, a aplicação da cogeração merece ser estudada, onde a relação eletricidade/calor, a intensidade do uso e o nível de temperatura definirão a tecnologia a ser utilizada. Neste contexto, conforme descrito por COGEN Europe (2001), a demanda pela utilidade calor pode ser classificado em quatro níveis distintos, conforme a temperatura de utilização:

- Processos de baixa temperatura (abaixo de 100 °C), como, por exemplo, água quente para uso doméstico, condicionamento de ar, secagem de produtos agrícolas.
- Processos de média temperatura (100 a 300 °C), como, por exemplo, produção de açúcar e álcool, indústrias de papel e celulose, têxtil, química. Nestes casos, o calor é geralmente fornecido sob a forma de vapor.
- Processos de alta temperatura (300 a 700 °C), como, por exemplo, algumas indústrias químicas.
- Processos de altíssima temperatura (acima de 700 °C), como, por exemplo, siderúrgicas, indústrias cerâmicas (vidro) e fábricas de cimento.

No setor industrial, há um grande potencial para a cogeração nos seguintes segmentos: alimentos e bebidas, cimento, cerâmica, têxtil, serraria, papel e celulose, refino de petróleo e siderurgia. A produção de papel e celulose agrega grandes quantidades de resíduos aproveitáveis (licor negro e detritos de madeira) que podem ser aproveitados como combustível em sistemas de cogeração, tornando este segmento praticamente autossuficiente em energia.

A siderurgia produz os gases de alto-forno que, mesmo com baixo poder calorífico, podem ser utilizados como combustível na produção de vapor para acionamentos mecânicos ou mesmo geração de energia elétrica.

Para o processo de produção de cimento, são aplicáveis os sistemas de cogeração tipo *bottoming*, onde o calor dos gases de exaustão do forno é recuperado num ciclo a vapor para geração de energia elétrica. Esta tecnologia também pode ser encontrada nas plantas de produção de fertilizantes, onde o calor rejeitado pelo reator de ácido sulfúrico (reação exotérmica de oxidação do enxofre) é aproveitado para a geração de eletricidade num ciclo a vapor.

A aplicação da cogeração em distritos industriais é um caso particularmente interessante, uma vez que a soma das variações de carga (térmica e elétrica) de um conjunto de indústrias poderá representar um regime contínuo de utilização, condição ideal para a viabilização de um sistema central de cogeração. Pode ser citado o caso da central cogeneradora Copene, de propriedade da empresa Braskem S.A., que fornece calor e eletricidade a um aglomerado de indústrias no polo petroquímico de Camaçari (BA).

Em aplicações prediais, às quais se incluem os setores comerciais e residenciais, a cogeração encontra viabilidade nos diversos segmentos: hospitais, hotéis, escolas e universidades, prédios de escritórios ou de apartamentos, casas, restaurantes, centros comerciais, supermercados, piscinas, etc...

A cogeração é utilizada para o suprimento simultâneo das demandas de eletricidade e calor. É evidente que a carga de eletricidade está presente em todos os segmentos citados, e no caso de demanda térmica, podemos mencionar o aquecimento de piscinas, a água quente para uso doméstico, a climatização de ambientes (*chiller* de absorção), o vapor para lavanderia, etc..., atividades presentes nos segmentos já citados.

A disponibilidade de gás natural e a compactação dos sistemas de cogeração trouxeram um grande incremento à sua utilização em aproveitamentos de pequeno porte, nos setores comerciais e residenciais. Os sistemas compactos para aplicação predial são disponibilizados numa faixa de potência elétrica entre 10 a 2000 kW, com as características de baixo custo, alta densidade elétrica (potência por volume de equipamento), rápida e fácil instalação (preparados para trabalharem sincronizados entre si isoladamente ou com a rede) e, principalmente, a operação automática, que dispensa a permanência contínua de profissional especializado.

O setor da cana-de-açúcar apresenta um grande potencial na utilização da cogeração. Mas existem limitações para a utilização da cogeração em algumas usinas sucroalcooleiras. Isto ocorre porque estas ainda utilizam caldeiras e turbinas a vapor de baixa pressão e baixa temperatura, dificultando, assim, o sistema de cogeração. Como exemplos de trabalhos cogeração aplicados ao setor sucroalcooleiro podem ser citados: Fiomari (2004), Walter (1994), Pietro (2003), Corrêa Neto (2001) e Del Campo (1999), dentre outros.

O segmento de papel e celulose apresenta características favoráveis para a implantação da cogeração, pois apresenta um elevado consumo de vapor de processo e eletricidade. Assim sendo, seu potencial de cogeração é expressivo, podendo as indústrias atingir a autossuficiência ou mesmo gerarem excedentes, com as tecnologias disponíveis comercialmente no país. Como exemplos de trabalhos de cogeração aplicados ao setor de

papel e celulose podem ser citados: Gallego (2004), Santos (2007) e Silveira e Lacava (1992), dentre outros.

A cogeração e a trigeração são muito bem implantadas no setor frigorífico, pois este setor necessita de uma grande demanda de energia térmica. A implantação dos sistemas de cogeração e trigeração de energia pode ser feitos em diversas outras áreas, como no segmento de cerâmica, *shopping*, hotéis e hospitais, onde existe um alto consumo de energia elétrica e térmica (sistema de refrigeração), dentre vários outros. Como exemplos de trabalhos de trigeração aplicados a esses setores podem ser citados: Silveira (1994), Santos (2001) e Takaki (2006), dentre outros.

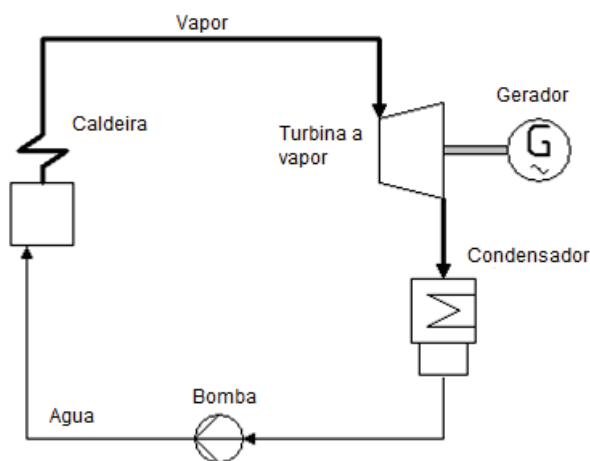
APÊNDICE B - CICLOS TÉRMICOS E DE POTÊNCIA

A seguir serão apresentados os principais ciclos utilizados para configurações de centrais de geração e cogeração de energia.

B.1 - CICLO DE RANKINE

O Ciclo de Rankine é o mais antigo e difundido sistema de geração de energia para indústrias com grandes necessidades de potência e onde para o processo seja necessário grandes quantidades de vapor. A Figura 39 mostra o diagrama de um Ciclo de Rankine.

Figura 39 - Representação esquemática de um Ciclo de Rankine.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Este ciclo utiliza o calor proveniente da combustão para a geração de vapor, ou seja, uma turbina movida pela expansão de vapor de água. A sua grande utilização pode ser atribuída a sua longa vida útil e a sua adequação ao uso de uma variedade enorme de combustíveis. Este sistema é composto por caldeira para gerar vapor a alta pressão e temperatura, turbina a vapor, condensador e bombas, sendo que a energia térmica gerada, na forma de calor, pode ser utilizada em processos industriais como aquecimento e geração de energia.

O rendimento de um ciclo Rankine pode ser aumentado pela redução da pressão de saída, pelo aumento da pressão no fornecimento de calor e pelo superaquecimento do vapor. O título do vapor que deixa a turbina aumenta pelo superaquecimento do vapor e diminui pelo

abaixamento da pressão de saída e pelo aumento da pressão no fornecimento de calor (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995).

Uma das formas de se elevar a temperatura de fornecimento de vapor é através da utilização de um trocador de calor adicional na caldeira, denominado superaquecedor. A expansão do vapor na turbina se dá quase toda na condição de “vapor seco”, o que favorece suas condições de escoamento através desta. Quase todas as usinas termelétricas trabalham com vapor superaquecido.

Outra maneira de aumentar o rendimento do ciclo é através do aquecimento regenerativo progressivo e gradual da água de alimentação da caldeira, o qual é realizado através de trocadores de calor, sendo o vapor, utilizado para o aquecimento nestes trocadores, extraído de diferentes pontos da turbina.

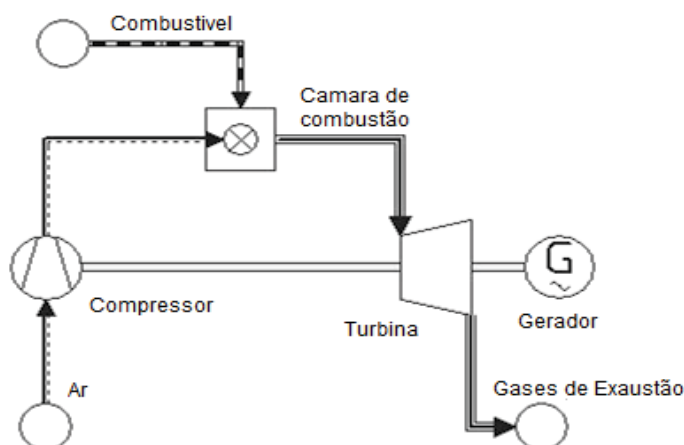
B.2 - CICLO DE BRAYTON

O aumento na eficiência das turbinas a gás alcançado nestas últimas décadas e a disponibilidade de gás a preços competitivos tem favorecido sua implantação em sistemas de cogeração para a indústria. Este tipo de sistema possui grande versatilidade de aplicação sendo encontradas turbinas a gás com potências que variam desde 1 MW até 200 MW (DEL CAMPO, 1999).

O ciclo padrão de ar Brayton é o ciclo para a turbina a gás simples, mostrado na Figura 40. As turbinas a gás são constituídas basicamente por um compressor de ar, uma câmara de combustão e uma turbina propriamente dita, que produz a potência necessária ao acionamento do compressor e, ainda, a potência útil para acionamento de um gerador elétrico ou para acionamento mecânico.

O compressor é um equipamento que, uma vez definidos seus parâmetros geométricos e a rotação, operará com uma vazão volumétrica de ar praticamente independente de outros fatores. Consequentemente, a massa de ar admitida, que por sua vez determina a potência da turbina, é diretamente influenciada pela densidade do ar na sua entrada. Por isso, as propriedades do ambiente que determinam a densidade do ar, altitude ou pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa, influem decisivamente na potência e eficiência da turbina (ANTUNES, 1999).

Figura 40 - Representação esquemática de um Ciclo de Brayton.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Sendo a turbina um equipamento volumétrico, a sua potência é determinada, basicamente, pela vazão em volume dos gases em sua entrada. O primeiro processo é a compressão do fluido de trabalho. Se a expansão deste fluido comprimido ocorrer diretamente e sem perdas, a potência desenvolvida pela turbina será tão somente igual à consumida no compressor. Mas, se for adicionada energia para aumentar a temperatura do fluido antes da expansão, haverá um aumento significativo na potência desenvolvida pela turbina, produzindo excedentes de potência em relação àquela necessária para acionar o compressor.

Ocorrem irreversibilidades ou perdas no processo de combustão e expansão, que reduzem o rendimento térmico do ciclo. O ciclo de turbinas a gás pode ser caracterizado por dois parâmetros significativos: a relação de pressão e a temperatura de queima. A relação de pressão do ciclo se refere ao quociente da pressão de descarga e a pressão de entrada, sendo que em turbinas modernas um valor típico é 14:1. Quando o objetivo é alcançar eficiências mais altas em operação em ciclos simples, empregando, por exemplo, turbinas aeroderivadas, são necessárias taxas de compressão mais elevadas, na faixa de 18:1 a 30:1 (IPT, 1996). A temperatura mais alta do ciclo é a temperatura de queima que chega a atingir 1.300 °C, sendo esta temperatura restringida por problemas de materiais. Temperaturas mais altas podem ser atingidas em turbinas com sistemas de resfriamento nas pás.

As turbinas se dividem em dois tipos básicos: aero derivativas e industriais. As turbinas aeroderivativas são baseadas na tecnologia adotada para a propulsão de aeronaves, sendo compactas e de peso reduzido. As turbinas industriais são mais robustas e, por isso, apresentam maior resistência a ambientes agressivos, permitindo processar combustíveis líquidos de baixa qualidade, e sua potência máxima supera em muito a das turbinas

aeroderivativas. Ambos os tipos apresentam elevada confiabilidade, fácil adaptabilidade a locais isolados e tempo bastante reduzido de manutenção.

Os rendimentos médios das turbinas aeroderivativas em condições ISO (nível do mar, temperatura de 15 °C e pressão de 1 atm) estão na faixa de 34 %, ao passo que as turbinas industriais apresentam rendimentos médios na faixa de 30 a 32 %.

Diversas modificações podem ser feitas no ciclo Brayton simples para aumentar o seu desempenho. Elas incluem regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento, ou uma combinação dessas três modificações, denominada ciclo composto. A regeneração é a recuperação de energia térmica (calor) dos gases de exaustão pelo ar comprimido antes de entrar no combustor. A eficiência do ciclo decresce à medida que a relação de pressões aumenta (exatamente o oposto do ciclo Brayton básico) e, além disso, depende das relações de temperatura. A regeneração aumenta a eficiência do ciclo até a relação de pressões na qual a temperatura do ar que sai do compressor é igual à temperatura dos gases de exaustão da turbina. Este tipo de ciclo diminui a temperatura dos gases de exaustão e pode não ser adequado para cogeração.

O resfriamento do ar comprimido entre os estágios de compressão oferece um aumento no trabalho líquido extraído do ciclo, mas diminui a eficiência. Se, além desse resfriamento intermediário, for adicionada a regeneração, a eficiência e o trabalho líquido são melhorados em relação ao ciclo simples. O reaquecimento requer um segundo combustor entre os estágios de expansão e tem os mesmos efeitos de um resfriamento intermediário, porém são menos pronunciados. Utilizando apenas o reaquecimento, há um aumento na produção de trabalho líquido com um decréscimo na eficiência do ciclo. Entretanto, se for adicionada a regeneração, o trabalho líquido e a eficiência são aumentados comparativamente ao ciclo simples.

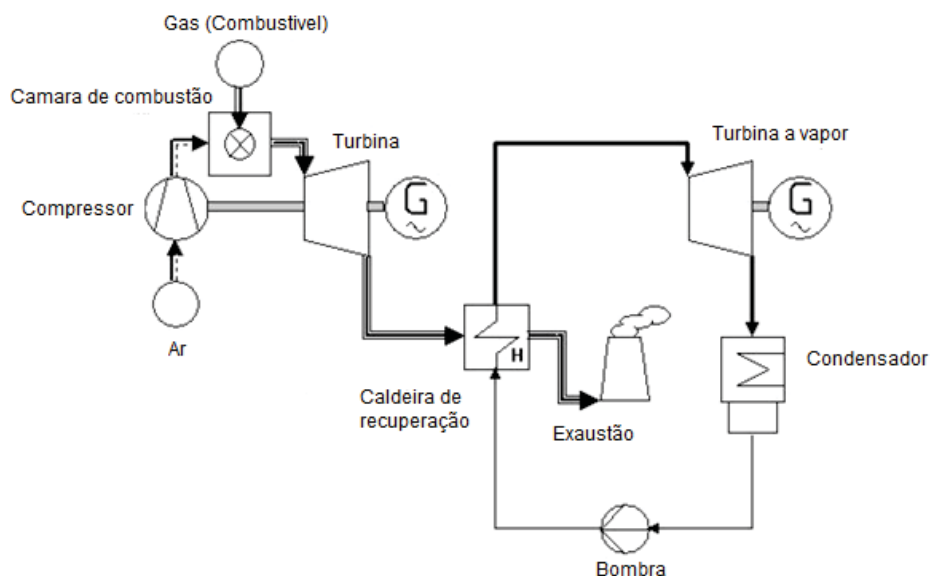
A regeneração, o resfriamento intermediário e o reaquecimento podem ser utilizados simultaneamente no ciclo composto. Este ciclo alcança a maior eficiência nas relações de pressão mais elevadas, mas exige uma maior quantidade de equipamentos e controles adicionais.

B.3 - CICLO COMBINADO

O ciclo combinado é uma combinação dos ciclos da turbina a gás (Ciclo Brayton) com o ciclo de turbina a vapor (Ciclo Rankine), conforme é mostrado na Figura 41.

A entalpia ainda disponível nos gases de exaustão da turbina de gás é aproveitada para gerar vapor sob pressão na caldeira de recuperação de calor, o qual irá expandir-se numa turbina a vapor, produzindo mais energia útil. Portanto, a geração de vapor pela caldeira de recuperação está diretamente ligada à vazão e temperatura dos gases de exaustão da turbina a gás.

Figura 41 - Representação esquemática de um ciclo combinado.



Fonte: Elaboração do autor através do programa Cycle-Tempo.

Nesta modalidade resulta uma alta eficiência de utilização do combustível, pois a alta temperatura de exaustão dos gases na turbina a gás permite suprir o ciclo a vapor. Consequentemente, parte das irreversibilidades de ambos os ciclos, que advém das temperaturas de rejeição de calor, são eliminadas no ciclo combinado. As caldeiras de recuperação usadas nos ciclos combinados podem ser de dois tipos: sem pós-queima, onde a geração de vapor só depende da vazão de gases recebidas da turbina a gás, e com queima suplementar, onde um combustível é queimado na caldeira de recuperação, aumentando, assim, a participação na geração de vapor. Em ambos os casos, essas caldeiras de recuperação são de concepção mais simples que as caldeiras convencionais, principalmente a caldeira sem pós-queima. Estas caldeiras podem gerar vapor em diferentes níveis de pressão (geralmente dois níveis, embora se possa chegar a três níveis), o que possibilita o uso de turbinas a vapor que permitem a injeção de fluxos adicionais de vapor entre a pressão de alimentação e a de condensação (DEL CAMPO, 1999).

diesel. Estes equipamentos são conhecidos como *bi-fuel* ou *dual-fuel* em função do modo que é executada a mistura dos combustíveis.

APÊNDICE C - EQUACIONAMENTO DE UMA PLANTA TÉRMICA E DE POTÊNCIA

Este apêndice mostra o equacionamento utilizado nos programas MATLAB e TPPS para a resolução da planta complexa apresentada no Capítulo 7.

C.1 - EQUACIONAMENTO PELO PROGRAMA MATLAB

Para resolução do problema pelo programa MATLAB foram utilizados as equações que seguem, as quais não possuem uma interligação dentro do MATLAB:

$$p2 := rp.p1 \quad (50)$$

$$p18 := \frac{p1}{0,97} \quad (51)$$

$$p7 := \frac{p18}{0,97} \quad (52)$$

$$p4 := \frac{p7}{0,95} \quad (53)$$

$$re := \frac{p3}{p4} \quad (54)$$

$$t2s := t1.rp^{\frac{y-1}{y}} \quad (55)$$

$$T2 := T1 + \frac{T2s - T1}{nC} \quad (56)$$

$$T2 := T1 + \frac{T2s - T1}{nC} \quad (57)$$

$$T4s := \frac{T3}{re^{\left(\frac{y-1}{y}\right)}} \quad (58)$$

$$T4 := T3 - nTG(T3 - T4s) \quad (59)$$

$$wC := cp.(T1 - T2) \quad (60)$$

$$wTG := cp.(T3 - T4) \quad (61)$$

$$wCB := wTG + wC \quad (62)$$

$$mHe1 := \frac{mHe}{2} \quad (63)$$

$$mHe := \frac{WCB}{wCBnG} \quad (64)$$

$$mHe1 := \frac{mHe}{2} \quad (65)$$

$$T13 := T11 + 0,47. (T15 - T11) \quad (66)$$

$$p9 := p13 \quad (67)$$

$$p10 := p11 \quad (68)$$

$$p12 := p9 \quad (69)$$

$$p14 := p8 \quad (70)$$

$$p15 := p8 \quad (71)$$

$$p16 := p8 \quad (72)$$

$$h9 := h8 - nTV. (h8 - h9s) \quad (73)$$

$$T6 := T15. \frac{K}{C} + pp + 273K \quad (74)$$

$$s10 := s9 \quad (75)$$

$$h10 := h9 - nTV. (h9 - h10s) \quad (76)$$

$$h12 := h11l + \frac{v11l. (p12 - p11)}{nB} \quad (77)$$

$$h14 := h13l + \frac{v13l. (p14 - p13)}{nB} \quad (78)$$

$$T6 := T15. \frac{K}{C} + pp + 273K \quad (79)$$

$$Rh1 := \frac{h16 - h15}{h8 - h16} \quad (80)$$

$$T5 := \frac{T6 + T4 - Rh1}{1 + Rh1} \quad (81)$$

$$Rh2 := \frac{h15 - h14}{h6 - h15} \quad (82)$$

$$T7 := T6. (1 + Rh2) - T5. Rh2 \quad (83)$$

$$T7b := T6. (1 + Rh2) - \frac{T6 + T4. Rh1}{1 + Rh1}. Rh2 \quad (84)$$

$$T7c := T6 - (T4 - T6). \frac{h15 - h14}{h8 - h15} \quad (85)$$

$$mv := \frac{mHe. cp. (T4 - T7)}{h8 - h14} \quad (86)$$

$$m12 := mv - m9 \quad (87)$$

$$m9 := \frac{mv. (h13 - h12)}{h9 - h12} \quad (88)$$

$$m9 := mv. \frac{h13l - h12}{h9 - h12} \quad (89)$$

$$m12 := mv - m9 \quad (90)$$

$$mc := m12 \quad (91)$$

$$WTV := mv. (h8 - h9) + mc. (h9 - h10) \quad (92)$$

$$WB1 := mc. (h12 - h11l) \quad (93)$$

$$WB := mv. (h14 - h13l) \quad (94)$$

$$WCR := (WTV - WB1 - WB). nG \quad (95)$$

$$qin := cp. (T3 - T2) \quad (96)$$

$$Qin := mHe. qin \quad (97)$$

$$noCB := \frac{WCB}{Qin} \quad (98)$$

$$QinCR := mv. (h8 - h14) \quad (99)$$

$$Q_{inCR1} := m_{He}.cp.(T4 - T7) \quad (100)$$

$$noCR := \frac{WCR}{Q_{inCR}} \quad (101)$$

$$nCC := noCB + noCR - noCB.noCR \quad (102)$$

$$mp := \frac{m_{He}.cp.(T3 - T2)}{cpp.(Tp - Tps)} \quad (103)$$

$$Ffa := \frac{Mf}{Ma} \quad (104)$$

$$mar := \frac{mp}{1 + Ffa} \quad (105)$$

$$mfr := Ffa.mar \quad (106)$$

$$Q_{outCR} := mc.(h10 - h11l) \quad (107)$$

$$mrefr := \frac{Q_{outCR}}{cpc.\Delta Tc.\frac{K}{C}} \quad (108)$$

$$Pe := mrefr.g.\frac{Hu}{nB} \quad (109)$$

$$T18 := T7 - mar.cpa.\frac{T17 - T1}{m_{He}.cp} \quad (110)$$

$$mref2 := m_{He}.\frac{cp.(T18 - T1)}{cpc.\Delta Tc.\frac{K}{C}} \quad (111)$$

$$wTV := (h8 - h9) + \frac{mc}{mv}.(h9 - h10) \quad (112)$$

$$wB1 := \frac{mc}{mv}.(h12 - h11l) \quad (113)$$

$$wB := (h14 - h13l) \quad (114)$$

$$wCR := (wTV - wB1 - wB).nG \quad (115)$$

$$SR := \frac{3600}{wCR} \quad (116)$$

$$HR := \frac{3600}{noCR} \quad (117)$$

$$WC := mHe.wC \quad (118)$$

$$WTG := mHe.wTC \quad (119)$$

$$bwr := \frac{-WC}{WTG} \quad (120)$$

$$bwrCR := \frac{WB1 + WB}{WTV} \quad (121)$$

$$QoutCB := mHe.cp.(T18 - T1) \quad (122)$$

$$Qout := QoutCR + QoutCB \quad (123)$$

$$Qinar := mar.cpa.(T17 - T1) \quad (124)$$

$$Qinar + Qout + \frac{WCB}{nG} + \frac{WCR}{nG} \quad (125)$$

$$Ra := cp.\left(\frac{y-1}{y}\right) \quad (126)$$

$$IC := mHE.T0.\left[cp.\ln\left(\frac{T2}{T1}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p2}{p1}\right)\right] \quad (127)$$

$$ICC := mHe.T0.\left[cp.\ln\left(\frac{T3}{T2}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p3}{p2}\right) - \frac{qin}{TH}\right] \quad (128)$$

$$ITG := mHe.T0.\left[cp.\ln\left(\frac{T4}{T3}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p4}{p3}\right)\right] \quad (129)$$

$$\Delta s47 := cp.\ln\left(\frac{T7}{T4}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p7}{p4}\right) \quad (130)$$

$$IHRSG := T0.\left\{mHe\left[cp.\ln\left(\frac{T7}{T4}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p7}{p4}\right)\right] + mv.(s8 - s14)\right\} \quad (131)$$

$$IRG := mHe.T0.\left[cp.\ln\left(\frac{T18}{T7}\right) - Ra.\ln\left(\frac{p18}{p7}\right)\right] \\ + mar.T0.\left[cpa.\ln\left(\frac{T17}{T1}\right) - cpa.\frac{ya-1}{ya}.\ln\left(\frac{p1}{p1}\right)\right] \quad (132)$$

$$IRE := mHe.T0. \left[cp.ln\left(\frac{T1}{T18}\right) - Ra.ln\left(\frac{p1}{p18}\right) \right] + mref2.T0.cpc.ln\left(\frac{Tas}{Tae}\right) \quad (133)$$

$$ITV := T0. [mv.(s9 - s8) + mc.(s10 - s9)] \quad (134)$$

$$ICD := mc.T0.(s11l - s10) + \frac{T0.QoutCR}{TL} \quad (135)$$

$$IFH := T0.(mv.s13l - m9.s9 - mc.s12) \quad (136)$$

$$IB1 := T0.mc.(s12 - s11l) \quad (137)$$

$$IB := T0.mv.(s14 - s13l) \quad (138)$$

$$I := IC + ICC + ITG + IHRSG + IRG + IRE + ITV + ICD + IFH + IB1 + IE \quad (139)$$

$$\Psi := mHe \left(1 - \frac{TL}{TH} \right). qin \quad (140)$$

$$\eta II := 1 - \frac{I}{\Psi} \quad (141)$$

$$\Delta s01 := cp.ln\left(\frac{T1}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p1}{p0}\right) \quad (142)$$

$$e1 := cp.(T1 - T0) - T0.\Delta s01 \quad (143)$$

$$E1 := mHe.e1 \quad (144)$$

$$\Delta s02 := cp.ln\left(\frac{T2}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p2}{p0}\right) \quad (145)$$

$$e2 := cp.(T2 - T0) - T0.\Delta s02 \quad (146)$$

$$E2 := mHe.e2 \quad (147)$$

$$EdC := -WC + E1 - E2 \quad (148)$$

$$\Delta s03 := cp.ln\left(\frac{T3}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p3}{p0}\right) \quad (149)$$

$$e3 := cp.(T3 - T0) - T0.\Delta s03 \quad (150)$$

$$E3 := mHe.e3 \quad (151)$$

$$Q23 := mHe.qin \quad (152)$$

$$EdCC := \left(1 - \frac{T0}{TH}\right) \cdot Q23 + E2 - E3 \quad (153)$$

$$\Delta s04 := cp.ln\left(\frac{T4}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p4}{p0}\right) \quad (154)$$

$$e4 := cp.(T4 - T0) - T0.\Delta s04 \quad (155)$$

$$E4 := mHe.e4 \quad (157)$$

$$EdTG := -WTG + E3 - E4 \quad (158)$$

$$\Delta s07 := cp.ln\left(\frac{T7}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p7}{p0}\right) \quad (159)$$

$$e7 := cp.(T7 - T0) - T0.\Delta s07 \quad (160)$$

$$E7 := mHe.e7 \quad (161)$$

$$e8 := h0ag.T0.(s8 - s0ag) \quad (162)$$

$$E8 := mv.e8 \quad (163)$$

$$e14 := h14.h0ag - T0.(s14 - s0ag) \quad (164)$$

$$E14 := mv.e14 \quad (165)$$

$$EdHRSG := E4 - E7 + E14 - E8 \quad (166)$$

$$\Delta s018 := cp.ln\left(\frac{T18}{T0}\right) - Ra.ln\left(\frac{p18}{p0}\right) \quad (167)$$

$$e18 := cp.(T18 - T0) - T0.\Delta s018 \quad (168)$$

$$E18 := mHe.e18 \quad (169)$$

$$Eage := mref2.\left[cp.c.(Tae - T0) - T0.cpc.ln\left(\frac{Tae}{T0}\right)\right] \quad (170)$$

$$Eags := mref2.\left[cp.c.(Tas - T0) - T0.cpc.ln\left(\frac{Tas}{T0}\right)\right] \quad (171)$$

$$\Delta s0are := cpa.\left[ln\left(\frac{T1}{T0}\right) - \frac{\gamma a - 1}{\gamma a}.ln\left(\frac{p1}{po}\right)\right] \quad (172)$$

$$\Delta s_{017} := cpa. \left[\ln \left(\frac{T_{17}}{T_0} \right) - \frac{\gamma a - 1}{\gamma a} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_0} \right) \right] \quad (173)$$

$$eare := cpa. (T_1 - T_0) - T_0. \Delta s_{0are} \quad (174)$$

$$Eare := mar. eare \quad (175)$$

$$e_{17} := cpa. (T_{17} - T_0) - T_0. \Delta s_{17} \quad (176)$$

$$E_{17} := mar. e_{17} \quad (177)$$

$$Ed_{RG} := E_7 - E_{18} - Eare - E_{17} \quad (178)$$

$$Ed_{RE} := E_{18} - E_1 + (E_{age} - E_{ags}) \quad (179)$$

$$e_9 := h_9 - h_{0ag} - T_0. (s_9 - s_{0ag}) \quad (180)$$

$$E_9 := m_9. e_9 \quad (181)$$

$$e_{10} := h_{10} - h_{0ag} - T_0. (s_{10} - s_{0ag}) \quad (182)$$

$$E_{10} := mc. e_{10} \quad (183)$$

$$Ed_{TV} := -WTV + E_8 - E_9 - E_{10} \quad (184)$$

$$e_{11} := h_{11l} - h_{0ag} - T_0. (s_{11l} - s_{0ag}) \quad (185)$$

$$E_{11} := mc. e_{11} \quad (186)$$

$$Ed_{CD} := \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \cdot Q_{outCR} + E_{10} - E_{11} \quad (187)$$

$$e_{12} := h_{12} - h_{0ag} - T_0. (s_{12} - s_{0ag}) \quad (188)$$

$$E_{12} := mc. e_{12} \quad (189)$$

$$Ed_{B1} := WB + E_{11} - E_{12} \quad (190)$$

$$e_{13} := h_{13l} - h_{0ag} - T_0. (s_{13l} - s_{0ag}) \quad (191)$$

$$E_{13} := mv. e_{13} \quad (192)$$

$$Ed_{FH} := E_9 + E_{12} - E_{13} \quad (193)$$

$$Ed_B := WB + E_{13} - E_{14} \quad (194)$$

$$Edt := Edc + EdCC + EdTG + EdHRSG + EdRG + EdRE + EdTV + EdCD + EdFH + EdB1 + EdB \quad (195)$$

$$Ef := \left(1 - \frac{T0}{TH}\right) Qin \quad (196)$$

$$\eta_{II2} := 1 - \frac{Edt}{Ef} \quad (197)$$

$$W_{planta} := WCB + WCR \quad (198)$$

$$\varepsilon_{planta} := \frac{W_{planta}}{Ef} \quad (199)$$

C.2 - EQUACIONAMENTO E RESOLUÇÃO DO PROBLEMA UTILIZANDO O TPPS

O mesmo problema foi equacionado e resolvido no programa TPPS sendo necessário converter alguns símbolos utilizados nas equações do MATLAB, conforme será mostrado na a seguir. Assim, cada equação que foi utilizada no MATLAB foi reescrita na forma utilizada pelo TPPS, o qual cria uma dependência entre as fórmulas e variáveis e, quando uma delas é alterada, o valor é refletido para todas as variáveis que estejam interligadas. A Tabela 18 mostra algumas conversões de símbolos.

Tabela 18 - Conversão de símbolos do MATLAB para o TPPS.

Símbolos MATLAB	Símbolos TPPS
ηG	nG
$\frac{\gamma-1}{\gamma}$	<u>y-const1</u> y
ηC	nC
ηTV	nTV
ηB	nB
ηoCB	noCB
ηoCR	noCR
ηCC	nCC
ΔT_c	Delta_tc
γa	ya
$\ln$	!
Ψ	yy
ηII	nyy
$\Delta s01$	Delta_01
$\Delta s02$	Delta_02
$\Delta s03$	Delta_03
$\Delta s04$	Delta_04
$\Delta s07$	Delta_07
$\Delta s018$	Delta_18
$\Delta s0are$	Delta_0are
$\Delta s47$	Delta_47
$\eta II2$	nII2
ε_{planta}	eplanta

Fonte: Elaboração do autor.

A seguir são apresentadas, numa forma sequencial e sem numeração, as equações correspondentes para simulação com o programa TPPS. A coluna da esquerda representa as variáveis utilizadas no problema, nesta coluna o usuário informa os valores iniciais, e, na coluna da direita, é apresentada a formulação envolvida.

Variáveis do sistema	Equacionamento
-- constantes	TERMO(FLUIDO('1',0,0)) TERMO(UN('P',tabelaP,0))
c100=100	
const0=0	-- Item A
const1=1	
const2=2	$p2 = rp * p1$
const1000=1000	$p18 = p1 / c097$
const100=100	$p7 = p18 / c097$
const10=10	$p3 = c097 * p2$
c097=0,97	$p4 = p7 / c095$
c095=0,95	$re = p3 / p4$
c047=0,47	
tabelaP=1 ;Configura Pressão Pa	$T2s = T1 * (rp^{((y - const1)/y)})$ $T2 = T1 + ((T2s - T1)/nC)$ $T4s = T3 / (re^{((y - const1)/y)})$ $T4 = T3 - nTG * (T3 - T4s)$
-- Valores iniciais	$wC = cp * (T1 - T2)$ $wTG = cp * (T3 - T4)$ $wCB = wTG + wC$ $mHe = WCB / (wCB * nG)$ $mHe1 = mHe / const2$
p1=100000 #pa; Pressão inicial	
T1=300 #K; Temperatura minima	
cp=5195 #j/kg.K	
nC=0,88	
nTG=0,88	
y=1,667	
rp=10	-- Item B
T3=1379,1 #K	$h8 = \text{TERMO}(H('PT', p8, T8))$ $s8 = \text{TERMO}(S('PH', p8, h8))$ $\text{TERMO}(C('PH', VAI, VA2))$
WCB=200000000 #W	$T13 = T11 + c047 * (T15 - T11)$ $h13 = \text{TERMO}(H('TX', T13, x13))$ $v13 = \text{TERMO}(V('TX', T13, x13))$ $s13 = \text{TERMO}(S('TX', T13, x13))$ $p13 = \text{TERMO}(P('TX', T13, x13))$
nG=0,96	
-- Item A	$h13l = \text{TERMO}(H('PT', p13, T13))$ $h13l = h13l * const1000$ $v13l = \text{TERMO}(V('PT', p13, T13))$ $s13l = \text{TERMO}(S('PT', p13, T13))$
p2 #pa	
p18 #pa	
p7 #pa	
p3 #pa	
p4 #pa	
re	
T2s #K	
T2 #K	
T4s #K	

T4 #K	p9=p13
wC #v	p10=p11
wTG #v	p12=p9
wCB #v	p14=p8
mHe #kg/s	p15=p8
MJ=1000000 #J	p16=p8
kJ=1000 #J	
mHe1 #kg/s	x11=const1
	h11v=TERMO(H('Px',p11,x11))
-- Item B	h11=TERMO(H('PT',p11,T11))
p8=12000000 #Pa	x11=const0
T8=520 #°C	h11l=TERMO(H('Px',p11,x11))
nTV=0,85	s11l=TERMO(S('PH',p11,h11l))
nB=0,80	v11l=TERMO(V('Px',p11,x11))
kPa=1000	s9s=s8
s8 #kJ/kg.K	
h8 #kJ/kg	v8=TERMO(V('PS',p8,s8))
T15=324,65 #°C	T9=TERMO(T('PS',p9,s9s))
p11=20998 #Pa	h9s=TERMO(H('PS',p9,s9s))
T11=61,16 #°C	h9=(h8-nTV*(h8-h9s))
	s9=TERMO(S('PH',p9,h9))
x13=0	s10s=s9
T13	
p13=0 #Pa	h10s=TERMO(H('PS',p10,s10s))
h13l #kJ/kg	x10s=TERMO(X('PS',p10,s10s))
v13l #m3/kg	h10=h9-nTV*(h9-h10s)
s13l #kJ/kg.K	
	s10=TERMO(S('PH',p10,h10))
p9 #Kpa	x10=TERMO(X('PH',p10,h10))
p10 #bar	
p12 #	h12=h11l+(v11l*(p12-p11))/nB
p14	s12=TERMO(S('PH',p12,h12))
p15	h12=h12*const1000
p16	h14=h13l+v13l*(p14-p13)/nB
x11=0	h14=((p14-p13)/nB)*v13l+h13l
	h14=h14/const1000
h13	
v13	T14=TERMO(T('PH',p14,h14))
s13	s14=TERMO(S('PH',p14,h14))
v12	
T12	T6=T15+pp+kelvin_273
	Rh1=(h16-h15)/(h8-h16)
h11l #kJ/kg	Rh2=(h15-h14)/(h16-h15)
h11v #kJ/kg	T5=(T6+T4*Rh1)/(const1+Rh1)
v11l	T7=T6*(const1+Rh2)-(T5*Rh2)

s11l	$T7b = T6 * (const1 + Rh2) - (T6 + T4 * Rh1) / (const1 + Rh1) * Rh2$
	$T7c = T6 - (T4 - T6) * (h15 - h14) / (h8 - h15)$
s9s #m2/k.s2	$mv = mHe * cp * (T4 - T7) / (h8 - h14) / const1000$
h9s #kJ/kg	$h9 = h9 * const1000$
h9	$m9 = mv * ((h13l - h12) / (h9 - h12))$
s9 #kJ/kg.K	$m12 = mv - m9$
s10s #m2/K.s2	$mc = m12$
h10s #kJ/kg	$h9 = h9 / const1000$
x10s	$WTV = (mv * (h8 - h9) + mc * (h9 - h10)) * const1000$
h10	$h12 = h12 / const1000$
s10 #kJ/kg.K	$WB1 = mc * ((h12 - h11l) * const1000)$
x10	$h14 = h14 * const1000$
	$WB = mv * (h14 - h13l)$
x8=0	
p9 #bar	$WCR = (WTV - WB1 - WB) * nG$
T9	
	-- Item C
p10	
p12 #bar	$qin = cp * (T3 - T2)$
h12	$Qin = mHe * qin$
s11	$Qin2 = Qin / const2$
s12 #kJ/kg.K	$noCB = WCB / Qin$
h11	
h14; Calculado pela pressão kPa	$QinCR = mv * (h8 * const1000 - h14)$
s14	$QinCR1 = mHe * cp * (T4 - T7)$
T14	$noCR = WCR / QinCR$
	$nCC = noCB + noCR - noCB * noCR$
h15=1491,8 #kJ/kg	
h16=2689,2 #kJ/kg	-- Item D
T15=324,65 #°C	
pp=20 #K	$mp = (mHe * cp * (T3 - T2)) / (cpp * (Tp - Tps))$
	$mp2 = mp / const2$
T6 #K	$Ffa = Mf / Ma * y1$
kelvin_273=273 #K	$mar = mp / (const1 + Ffa)$
Rh1	$mfr = Ffa * mar$
Rh2	$mfr2 = mfr / const2$
T5	$mar2 = mar / const2$
T7	
T7b #K	-- Item F
T7c #K	
cpa=1005 #J/kg.K	$QoutCR = mc * (h10 - h11l) * const1000$
mv #kg/s; Convertido 1000	$mrefr = QoutCR / (cpc * delta_tc)$
m9 #kg/s	$Pe = mrefr * g * (Hu / nB)$
m12 #kg/s	$T18 = T7 - mar * cpa * ((T17 - T1) / (mHe * cp))$
mc #kg/s	$mref2 = mHe * ((cp * (T18 - T1) / (cpc * delta_tc)))$
WTV #W	

```

WB1 #W
WB #W
WCR #W
-- Item C
qin #W
Qin #W
Qin2 #W
noCB
QinCR #W
QinCR1 #W
noCR
nCC
-- Item D
cpp=1309,6 #J/kg.K
Tp=1520 #K
Tps=670 #K
mp #kg/s
mp2 #kg/s
Ma=28,64
Mf=16
y1=0,0470
Ffa
mar #kg/s
mfr #kg/s
mfr2 #kg/s
mar2 #kg/s
-- Item F
QoutCR #W
cpc=4180 #J/kg.K
delta_tc=20 #°C
T17=519,75 #K
mrefr #kg/s
Hu=30 #m
Pe #W
g=9,80
T18 #K
mref2 #kg/s
-- Item G
-- Item G
wTV=((h8-h9)+(mc/mv)*(h9-h10))*const1000
wB1=(h12-h11l)*const1000*(mc/mv)
wB=(h14-h13l)
wCR=(wTV-wB1-wB)*nC
SR=const3600/wCR*const1000
HR=const3600/noCR
-- Item H
WC=mHe*wC
WTG=mHe*wTG
bwr=(WC/WTG)*negativo
bwrCR=(WB1+WB)/WTV
-- Item I
QoutCB=mHe*cp*(T18-T1)
Qout=QoutCR+QoutCB
Qinar=mar*cpa*(T17-T1)
Qindice=Qout/Qin
Qgeral=Qinar+Qout+(WCB/nG)+(WCR/nG)
-- Item J
TL=T0
Ra=cp*(y-const1)/y
IC=mHe*T0*((cp*(T2/T1))-(Ra*(p2/p1)))
IC2=IC/const2
ICC=mHe*T0*((cp*(T3/T2))-(Ra*(p3/p2))-(qin/TH))
ICC2=ICC/const2
ITG=mHe*T0*((cp*(T4/T3))-(Ra*(p4/p3)))
ITG2=ITG/const2
Delta_47=(cp*(T7/T4))-((Ra*(p7/p4)))
-- Nao coincide os resultados para IHRSG
aux_1=cp*(T7/T4)
aux_2=Ra*(p7/p4)
aux_3=mv*(s8*const1000-s14*const1000)
IHRSG=T0*(mHe*(aux_1-aux_2)+aux_3)
-- Item G

```

wTV #v	$IRG = mHe * T0 * ((cp * (T18/T7)) - (Ra * (p18/p7))) + mar * T0 * ((cpa * (T17/T1)) - (cpa * ((ya - const1ya)/ya)) * (p1/p1))$
wB1 #v	$IRE = mHe * T0 * ((cp * (T1/T18)) - (Ra * (p1/p18))) + mref2 * T0 * cpc * !(Tas/Tae)$
wB #v	
wCR #v	$ITV = T0 * (mv * (s9 - s8) + mc * (s10 - s9)) * const1000$
SR #kg	
HR #kJ/kWh	$ICD = mc * T0 * (s11l - s10) + (T0 * QoutCR) / TL$
const3600=3600	$ICD = ICD / const10$
-- Item H	
	$IFH = T0 * (mv * s13l - m9 * s9 - mc * s12) * const100$
WC #W	$IB1 = (T0 + kelvin_273) * mc * (s12 - s11l)$
WTG #W	$IB = ((T0 + kelvin_273) * mv * (s14 - s13l)) * const100$
bwr	
negativo=-1	$I = IC + ICC + ITG + IHRSG + IRG + IRE + ITV + ICD + IFH + IB1 + IB$
bwrCR	$yy = mHe * (const1 - (TL/TH)) * qin$
	$nyy = const1 - (i/yy)$
-- Item I	
	$p0 = p1$
QoutCB #W	
Qout #W	$Delta_01 = (cp * (T1/T0)) - (Ra * (p1/p0))$
Qinar #W	$e1 = cp * (T1 - T0) - (T0 * Delta_01)$
Qindice	$E1 = mHe * e1$
Qgeral #W	
	$Delta_02 = (cp * (T2/T0)) - (Ra * (p2/p0))$
-- Item J	$e2 = cp * (T2 - T0) - (T0 * Delta_02)$
	$E2 = mHe * e2$
T0=300 #K	$EdC = (WC * negativo) + E1 - E2$
TH=1520 #K	$EdC2 = EdC / const2$
TL	$Delta_03 = (cp * (T3/T0)) - (Ra * (p3/p0))$
Ra #m2/K.s2	$e3 = cp * (T3 - T0) - (T0 * Delta_03)$
	$E3 = mHe * e3$
IC #W	$Q23 = mHe * qin$
IC2 #W	$EdCC = (const1 - (T0/TH)) * Q23 + E2 - E3$
ICC #W	$EdCC2 = EdCC / const2$
ICC2 #W	
ITG #W	$Delta_04 = (cp * (T4/T0)) - (Ra * (p4/p0))$
ITG2 #W	$e4 = cp * (T4 - T0) - (T0 * Delta_04)$
	$E4 = mHe * e4$
T8=520 #°C	$EdTG = negativo * WTG + E3 - E4$
ya=1,4	$EdTG2 = EdTG / const2$
Delta_47 #m2/K.s2	
IHRSG #W	$Delta_07 = (cp * (T7/T0)) - (Ra * (p7/p0))$
aux_1	$e7 = cp * (T7 - T0) - (T0 * Delta_07)$
aux_2	$E7 = mHe * e7$

aux_3	$e8=(h8-h0ag-T0*(s8-s0ag))*const1000$
IRG #W	$E8=(mv*e8)$
Tas=313 #K	$h14=h14/const1000$
Tae=293 #K	$e14=(h14-h0ag-T0*(s14-s0ag))*const1000$
IRE #W	$E14=mv*e14$
ITV #W	
ICD #W	$EdHRSG=E4-E7+E14-E8$
IFH #W	$\Delta_{18}=(cp*(T18/T0))-(Ra*(p18/p0))$
IB1 #W	$e18=(cp*(T18-T0)-(T0*\Delta_{18}))$
IB #W	$E18=mHe*e18$
I #W	$Eage=mref2*(cpc*(Tae-T0)-T0*cpc*(Tae/T0))$
yy #W	$Eags=mref2*(cpc*(Tas-T0)-T0*cpc*(Tas/T0))$
nyy #W	$\Delta_{0are}=cpa*(!(T1/T0)-((ya-const1)/ya)*!(p1/p0))$
p0	$\Delta_{17}=(cpa*(!(T17/T0)-((ya-const1)/ya)*!(p1/p0))$
Delta_01 #m2/K.s2	$eare=cpa*(T1-T0)-T0*\Delta_{0are}$
e1 #Sv	$Eare=mar*eare$
E1 #W	$e17=cpa*(T17-T0)-T0*\Delta_{17}$
Delta_02 #m2/K.s2	$E17=mar*e17$
e2 #Sv	$EdRG=E7-E18+Eare-E17$
E2 #W	$EdRE=E18-E1+(Eage-Eags)$
EdC #W	$e9=(h9-h0ag-T0*(s9-s0ag))*const1000$
EdC2 #W	$E9=m9*e9$
Delta_03 #m2/K.s2	$e10=(h10-h0ag-T0*(s10-s0ag))*const1000$
e3 #Sv	$E10=mc*e10$
E3 #W	$EdTV=negativo*WTV+E8-E9-E10$
Q23 #W	$e11=(h11l-h0ag-T0*(s11l-s0ag))*const1000$
EdCC #W	$E11=mc*e11$
EdCC2 #W	$EdCD=(const1-T0/TL)*QoutCR+E10-E11$
Delta_04 #m2/K.s2	$e12=(h12-h0ag-T0*(s12-s0ag))*const1000$
e4 #Sv	$E12=mc*e12$
E4 #W	$EdB1=WB1+E11-E12$
EdTG #W	
EdTG2 #W	$e13=h13l-h0ag-(T0*(s13l-s0ag))*const1000$
Delta_07 #m2/K.s2	$E13=mv*e13$
e7 #Sv	$EdFH=E9+E12-E13$
E7 #W	
h0ag=125,9 #kJ/kg	$EdB=(E14-E13+WB)/const100$

s0ag=0,4369 kJ/kg.K

e8 #Sv

E8 #W

e14 #Sv

E14 #W

EdHRSG #W

Delta_18 #m2/K.s2

e18 #Sv

E18 #W

Eage #W

Eags #W

Delta_0are #m2/K.s2

Delta_17 #m2/K.s2

eare #Sv

Eare #W

e17 #Sv

E17 #W

EdRG #W

EdRE #W

e9 #Sv

E9 #W

e10 #Sv

E10 #W; Variavel E10

EdTV #W; Variavel EdTV

e11 #Sv; Variavel e11

E11 #W; Variavel E11

EdCD #W

e12 #Sv

E12 #W

EdB1 #W

e13 #Sv

E13 #W

EdFH #W

EdB #W

Edt #W; Falta edb1+edb

Ef #W

nii2 #W

Wplanta #W

ef

eplanta

Edt=EdC+EdCC+EdTG+EdHRSG+EdRG+EdRE+EdTV+EdCD+
EdFH+EdB1+EdB

ef=(const1-T0/TH)*Qin

nii2=const1-edt/ef

Wplanta=WCB+WCR

eplanta=Wplanta/ef

-- propriedades

h1=TERMO(H('PT',p1,T1))

s1=TERMO(s('PT',p1,T1))

h2=TERMO(H('PT',p2,T2))

s2=TERMO(s('PT',p2,T2))

h3=TERMO(H('PT',p3,T3))

s3=TERMO(s('PT',p3,T3))

h4=TERMO(H('PT',p4,T4))

s4=TERMO(s('PT',p4,T4))