



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

– Mestrado – Doutorado

INTERAÇÃO DA TEORIA ASCENDANCY COM A TERMOECONOMIA: APLICAÇÃO A SISTEMAS INDUSTRIAIS

por

Daniel Fernandes Queiroga Leite

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para a obtenção do grau de mestre*

João Pessoa-Paraíba

Julho, 2018

DANIEL FERNANDES QUEIROGA LEITE

**INTERAÇÃO DA TEORIA *ASCENDANCY* COM A
TERMOECONOMIA: APLICAÇÃO A SISTEMAS
INDUSTRIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento
às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientadora: Prof^a Monica Carvalho, PhD.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L533i Leite, Daniel Fernandes Queiroga.

Interação da teoria ascendancy com a termoeconomia :
aplicação a sistemas industriais / Daniel Fernandes
Queiroga Leite. - João Pessoa, 2018.
95 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Termoeconomia. 2. Ascendancy. 3. Sistemas
Industriais. I. Carvalho, Monica. II. Título.

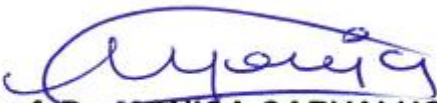
UFPB/BC

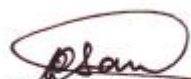
**INTERAÇÃO DA TEORIA ASCENDANCY COM A
TERMOCOLOGIA: APLICAÇÃO A SISTEMAS
INDUSTRIAIS**

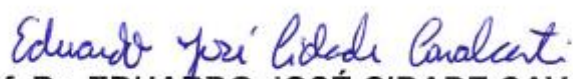
por

DANIEL FERNANDES QUEIROGA LEITE

Dissertação aprovada em 12 de julho de 2018


Prof. Dr. MONICA CARVALHO
Orientador – UFPB


Prof. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. EDUARDO JOSÉ CIDADE CAVALCANTI
Examinador Externo – UFRN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos pilares da minha vida, responsáveis por me preparar para todo e qualquer desafio, aos meus pais, Aderaldo e Danúzia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido saúde e força para superar as dificuldades e conseguir finalizar mais uma etapa da minha vida.

A Universidade Federal da Paraíba – UFPB, seu corpo docente, pelo conhecimento adquirido, importante para minha formação acadêmica.

A minha orientadora, professora PhD Monica Carvalho, pela oportunidade de mais uma vez ser seu aluno. Sou muito grato pelo apoio, paciência, disponibilidade, atenção e profissionalismo.

Aos professores Júlio Augusto Mendes da Silva, da Universidade Federal da Bahia, e Luis Serra Renobales, da Universidad de Zaragoza, pelos comentários e contribuições feitas para a publicação derivada deste trabalho.

Aos meus pais, Aderaldo e Danúzia, pela educação concedida, os conselhos e todo o apoio demonstrado, aos meus irmãos, Diego e Danilo, e a minha namorada, Karoline, pelo companheirismo e incentivo.

A CAPES pela bolsa disponibilizada durante o período de um ano.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho, o meu muito obrigado.

INTERAÇÃO DA TEORIA ASCENDANCY COM A TERMoeconomia: APLICAÇÃO A SISTEMAS INDUSTRIAIS

RESUMO

O presente trabalho aborda a interação da teoria *Ascendancy* com a Termoeconomia. A preocupação crescente pela economia de energia tem incentivado o desenvolvimento de técnicas de avaliação e diagnóstico de sistemas, com base na Segunda Lei da Termodinâmica e no conceito de exergia. Nesse contexto surgiu o conjunto de metodologias denominado Termoeconomia, cujo objetivo é alocar os custos e otimizar de forma econômica os sistemas térmicos, baseada em conceitos termodinâmicos da operação do sistema. A Termoeconomia se utiliza da propriedade exergia, que pode ser definida como a capacidade de se produzir um efeito útil. O crescimento e desenvolvimento dos ecossistemas está sujeito a restrições e além da exergia, outras propriedades, como por exemplo *Ascendancy*, podem ser descritas como uma função-objetivo que indica a saúde (estado) de ecossistemas, sintetizando informações sobre os fluxos de energia e matéria em relação a um estado teórico ideal. Esta proposta de dissertação de mestrado detalha a função-objetivo *Ascendancy*, que geralmente se aplica a ecologia industrial, mostrando que os sistemas vivos tendem a se auto-organizar aumentando seu *Ascendancy*. O *Ascendancy* foi descrito matematicamente, e sua formulação foi estendida para sistemas energéticos industriais, e aplicada a sistemas termodinâmicos simples. As informações proporcionadas pelo *Ascendancy* foram comparadas àquelas fornecidas pela análise termoeconômica de um Ciclo Rankine. Quatro configurações com diferentes graus de interconexão entre os equipamentos foram estudadas, mantendo constante o produto final do sistema, e depois o mesmo sistema foi estudado com considerações de diferentes rendimentos para a turbina, ainda com produto final constante. Os resultados demonstraram que, ao comparar configurações diferentes de igual grau de interconexão entre equipamentos e rendimentos parecidos, a configuração com o maior valor do *Ascendancy* tem maior possibilidade de otimização.

Palavras-chave: Termoeconomia, *Ascendancy*, Sistemas Industriais.

INTERACTION BETWEEN THE ASCENDANCY THEORY AND THERMOECONOMICS: APPLICATION TO INDUSTRIAL SYSTEMS

ABSTRACT

The present work addresses the interaction between the Ascendancy theory with Thermoeconomics. The growing concern for energy savings has encouraged the development of systems assessment and diagnostic techniques, based on the Second Law of Thermodynamics and the concept of exergy. In this context came the set of methodologies called Thermoeconomics, whose objective is to allocate costs and optimize economically the thermal systems, based on thermodynamic concepts of the system operation. Thermoeconomics uses exergy property, which can be defined as the ability to produce a useful effect. The growth and development of ecosystems is subject to restrictions and, in addition to exergy, other properties, such as Ascendancy, can be described as an objective function that indicates the health (state) of ecosystems, synthesizing information on energy and matter flows in relation to an ideal theoretical state. This study details the Ascendancy objective function, which generally applies to industrial ecology, showing that living systems tend to self-organize by increasing their Ascendancy. The Ascendancy was described mathematically, and its formulation was adapted for industrial energy systems, and applied to simple thermodynamic systems. The information provided by Ascendancy was compared to those provided by the thermoeconomic analysis of a Rankine Cycle. Four configurations with different degrees of interconnection between the equipment were studied, keeping the final product of the system constant, and then the same system was studied with different performance considerations for the turbine, with constant final product. The results showed that, when comparing different configurations of the same degree of interconnection between equipments and similar yields, the configuration with the highest value of Ascendancy has a greater possibility of optimization.

Keywords: Thermoeconomics, Ascendancy, Industrial Systems.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	v
CAPÍTULO I.....	18
INTRODUÇÃO.....	18
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivo específico.....	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
CAPÍTULO II.....	22
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	22
2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA, EXERGIA, EFICIÊNCIA.....	23
2.3 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS CUSTOS.....	25
2.4 TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO	27
2.5 ESTRUTURA FÍSICA E PRODUTIVA	29
2.6 ASCENDANCY	32
2.6.1 Formulação Matemática.....	34
2.6.2 Autocatálise.....	36
2.6.3 Crescimento, desenvolvimento e <i>Ascendancy</i>	36

2.7 ESTADO DA ARTE	39
CAPÍTULO III	43
MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 CICLO RANKINE	43
3.1.1 Ciclo Rankine com Sobreaquecimento	44
3.1.2 Ciclo Rankine com Reaquecimento	45
3.1.3 Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo	46
3.1.4 Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo	47
3.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA.....	48
3.2.1 Balanço de massa	49
3.2.2 Balanço de energia	50
3.2.3 Balanço de exergia	50
3.3 MATRIZ RECURSO - PRODUTO	52
3.4 ASCENDANCY EXTENDIDO A UMA PLANTA INDUSTRIAL.....	54
CAPÍTULO IV	57
RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 GRAU DE INTERCONEXÃO VERSUS <i>ASCENDANCY</i>	57
4.1.1 Ciclo Rankine com sobreaquecimento	57
4.1.2 Ciclo Rankine com reaquecimento	58
4.1.3 Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo	59
4.1.4 Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.	61
4.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA VERSUS <i>ASCENDANCY</i>	63
4.2.1 Rendimento isoentrópico 100%	63
4.2.2 Rendimento isoentrópico 90%	64
4.2.3 Rendimento isoentrópico 80%	64

4.2.3 Rendimento isoentrópico 70%	65
4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
4.3.1 Grau de interconexão versus <i>Ascendancy</i>	65
4.3.1 Eficiência do sistema versus <i>Ascendancy</i>	66
CAPÍTULO V	69
CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE I	77
APÊNDICE II	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Cadeia lógica de conceitos termoeconômicos (VALERO; TORRES, 2006).	28
Figura 2.2 - Estrutura física de um ciclo Rankine simples. (Fonte: Modificado de TORRES; VALERO, 2000).....	29
Figura 2. 3 Representação esquemática dos efeitos da autocatálise em um sistema. (Fonte: ULANOWICZ, 1999b)	36
Figura 3. 1 - Unidade térmica simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)	44
Figura 3. 2 - Ciclo com reaquecimento. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006).....	45
Figura 3. 3 - Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)	47
Figura 3. 4 - Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)	48
Figura 3. 5 - (a) Diagrama físico de um sistema térmico, (b) Gráfico da estrutura produtiva do sistema. (Fonte: Modificado de Torres e Valero, 2000)	53
Figura 3. 6 - Estrutura produtiva de um condensador. (Fonte: Torres e Valero, 2000)	53
Figura 3. 7 - Estrutura produtiva de um compressor. (Fonte: Torres e Valero, 2000)	54
Figura 3. 8 - Estrutura produtiva de uma turbina. (Fonte: Torres e Valero, 2000)	54
Figura 3. 9 - Estrutura produtiva de uma caldeira de recuperação (HRSG). (Fonte: Torres e Valero, 2000).....	54
Figura 4. 1 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com sobreaquecimento.	58
Figura 4. 2 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com reaquecimento.	59
Figura 4. 3 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.	60

Figura 4. 4 - Estrutura produtiva do ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.	62
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Estrutura produtiva do ciclo Rankine	30
Tabela 2. 2 - Atributos da sucessão ecológica: tendências esperadas no desenvolvimento de ecossistemas (ODUM, 1969)	33
Tabela 2. 3 - Tabela de frequências hipotéticas para um número de ocorrências conjuntas entre quatro causas (an) e cinco resultados (bn)	35
Tabela 2. 4 - Tabela de frequências, igual à Tabela 2.3, mas isolando as causas	35
 Tabela 3. 1 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento	45
Tabela 3. 2 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com reaquecimento.....	46
Tabela 3. 3 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré- aquecimento regenerativo	47
Tabela 3. 4 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.....	48
Tabela 3. 5 - Tabela Recurso – Produto hipotética para um sistema formado por quatro equipamentos.....	55
 Tabela 4. 1 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento	58
Tabela 4. 2 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com reaquecimento.....	59
Tabela 4. 3 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré- aquecimento regenerativo	61
Tabela 4. 4 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.....	62
Tabela 4. 5 - Resumo dos valores do rendimento e do Ascendancy dos ciclos Rankine	63
Tabela 4. 6 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=100\%$	63
Tabela 4. 7 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=90\%$	64
Tabela 4. 8 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=80\%$	64

Tabela 4. 9 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=70\%$	65
Tabela 4. 10 - Resultados obtidos para os diferentes rendimentos isoentrópicos da turbina	66

LISTA DE SÍMBOLOS

A	<i>Ascendancy</i>
a	Causas de ocorrências
b	Resultados de ocorrências
B	Exergia
c	Custo monetário unitário
C	Custo monetário
$\frac{dE}{dt}$	Taxa de variação de energia
$\frac{dm}{dt}$	Taxa de variação de massa
e	Disponibilidade
F	Recurso
g	Gravidade
H	Entalpia
h	Entalpia específica
I	Irreversibilidade
inc	Incerteza
k	Custo unitário exergético
L	Perdas
m	Massa
N	Número de moles
P	Produto
$p(a, b)$	Probabilidade conjunta
$p(b a)$	Probabilidade condicional
Q	Calor
S	Entropia

T	Intercâmbios (magnitude de quantificar transferência de material ou energia)
Temp	Temperatura
V	Velocidade
W	Trabalho
y	Taxa de extração mássica
z	Taxa de extração mássica
Z	Fluxo financeiro

Letras gregas

η	Eficiência exergética
μ	Potencial químico
ϑ	posição relativa (cota)
ρ	Razão entre variação de entropia gerada em cada equipamento e no condensador

SOBRESCRITOS

*	Custo
T	Total

SUBESCRITOS

0	Estado de referência
c	Fornecido
e	Entrada
f	Fluxo
g	Gerada
i	i-ésimo
j	j-ésimo
m	Investimento de operação e manutenção

n	Ocorrência
oe	Objeto de estudo
s	Saída

SIGNIFICADO DE CITAÇÕES EM LATIM NO TEXTO

<i>i.e.</i>	Isto é
<i>et al.</i>	E outros
<i>apud</i>	Junto a, perto de, em

LISTAS DE SIGLAS

AF	Análise Funcional
AFT	Análise Funcional Termodinâmica
TCE	Teoria do Custo Exergético
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
P1	Proposição 1
P2	Proposição 2
P3	Proposição 3

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Considerando o aumento acentuado da demanda de eletricidade no Brasil, juntamente com o progressivo processo de conscientização do uso mais racional e sustentável da energia, é necessário melhorar e otimizar sistemas energéticos. O foco é obter o máximo de eficiência dos equipamentos, menores gastos com manutenção, maior confiabilidade e vida útil de forma a se minimizar os custos com consumo de combustíveis, operação e de produção da eletricidade.

Por um lado, parte-se da Segunda Lei da Termodinâmica, que estabelece o princípio do aumento da entropia, onde os processos que podem ocorrer na natureza são tais que a entropia do universo sempre aumenta. Relacionando-se o aumento de entropia com a destruição de exergia, existe a tendência de otimizar sistemas termodinâmicos por meio da minimização da exergia destruída. Quanto maior a destruição de exergia associada a um processo, maiores as oportunidades para melhorias e otimização (*i.e.*, evolução e desenvolvimento).

Por outro lado, estabelece-se que os ecossistemas também evoluem e se desenvolvem. O estado evolutivo de um ecossistema pode ser quantificado por meio de propriedades emergentes, que não podem ser determinadas quando estudamos os compartimentos em separado (só há sentido quando os componentes estão interligados). A quantificação destas propriedades é feita por funções-meta, como por exemplo, *Ascendancy* e exergia, que são maneiras de analisar ecossistemas.

Desde os anos 1980, propriedades como o *Ascendancy* e a exergia tentam sintetizar as informações sobre fluxos de energia e matéria em relação a um estado teórico ideal, separadamente. A motivação para o desenvolvimento deste trabalho origina-se na similaridade entre as formas de tratamento de informação (matrizes) encontradas na termoeconomia e *Ascendancy*, e na possibilidade de obtenção de informação adicional ao estender uma teoria de ecologia industrial a uma metodologia de alocação de custos. A termoeconomia, comumente aplicada a otimização e diagnóstico de sistemas energéticos, é aqui proposta como ferramenta para caracterização do *Ascendancy*.

Esta proposta de trabalho é um dos primeiros passos na combinação de Termoeconomia e *Ascendancy*, que possui o potencial de ajudar a resolver vários problemas importantes, como a identificação de possibilidades de integração e melhoria de eficiência, quantificação dos benefícios obtidos devido à integração ou determinação de custos. Todas as técnicas termoeconômicas desenvolvidas ao longo dos anos para a análise, otimização e diagnóstico de sistemas energéticos possuem potencial de combinação com *Ascendancy*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estender o *Ascendancy*, parâmetro usualmente aplicado a ecossistemas (ecologia industrial), a sistemas energéticos industriais na busca de traduzi-lo a termos termodinâmicos, por meio da Termoeconomia.

1.2.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Adquirir os conhecimentos necessários, por meio de revisão bibliográfica, sobre o *Ascendancy*: princípios, conceitos e aplicações.
- Aprofundar os conhecimentos, por meio de revisão bibliográfica e estudos de caso, sobre a Termoeconomia.
- Estender a teoria do *Ascendancy* para plantas industriais, por meio da Termoeconomia.

- Aplicar a extensão do ponto anterior a várias configurações de ciclos Rankine: com sobreaquecimento, com reaquecimento, com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo, e com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.
- Aplicar a extensão a uma das configurações anteriores, variando somente o rendimento isoentrópico da turbina.
- Verificar e interpretar que tipo de informação a extensão do *Ascendancy*, por meio da Termoeconomia, proporciona a sistemas industriais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em sete capítulos que descrevem todas as etapas realizadas ao decorrer do estudo.

O Capítulo 1 faz uma introdução justificando o que motivou o desenvolvimento desse trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos.

O Capítulo 2 trata sobre a fundamentação teórica, introduzindo a Termoeconomia e a ferramenta termoeconomica utilizada neste trabalho, a Teoria do Custo Exergético. São especificados os conceitos de exergia, eficiência e a Segunda Lei da Termodinâmica. Além disso, este capítulo mostra o processo de formação dos custos e a estrutura física e produtiva de um sistema térmico. Por fim, é apresentada a formulação matemática da teoria *Ascendancy*.

O Capítulo 3 expõe os materiais e métodos, descrevendo sobre o ciclo Rankine e as quatro configurações utilizadas. Posteriormente, as equações gerais dos balanços de massa energia e exergia, primordiais para a análise termodinâmica, são apresentadas. E, por fim, são exibidos os conceitos para a formulação da matriz Recurso-Produto e do *Ascendancy* para a aplicação em uma planta industrial.

No Capítulo 4 são feitas duas verificações dos resultados obtidos a partir da modelagem termodinâmica e termoeconomica realizada no software Engineering Equation Solver (EES), a primeira entre o grau de interconexões versus o *Ascendancy* e a segunda entre a eficiência do sistema versus o *Ascendancy*. Por fim são apresentadas as devidas discussões dos resultados.

O Capítulo 5 aborda as conclusões.

No Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho e o Apêndice I e II. O Apêndice I mostra o código computacional desenvolvido no software EES, e o Apêndice II apresenta os cálculos das tabelas Recurso-Produto realizados no software Excel a partir dos valores extraídos da modelagem do Apêndice I.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo inicialmente aborda a Termoeconomia: a partir da Teoria do Custo Exergético são apresentados os conceitos de exergia e eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica. Em sequência são mostrados o processo de formação dos custos e a estrutura física e produtiva de um sistema térmico. Além disso, o conceito *Ascendancy* é apresentado para posterior extensão dessa teoria a sistemas industriais.

2.1 INTRODUÇÃO

O setor industrial busca constantemente um melhor aproveitamento dos recursos energéticos e gerenciamento dos custos. Sistemas energéticos (conjunto de subsistemas ou processos) consomem recursos externos ao interagirem com o ambiente para transformá-los em produtos. Essas transformações têm o intuito de proporcionar esse melhor aproveitamento através de um aumento na utilidade econômica (VALERO; TORRES, 2006).

Nas últimas décadas a compreensão de como melhorar a concepção, a operação de sistemas energéticos e os resíduos do ambiente tem sido objeto de grande interesse (VALERO; TORRES, 2006). Esses problemas evidenciam a inter-relação entre a Termodinâmica e a Economia. Em 1962, Evan e Tribus propuseram o termo *Termoeconomia* cujo objetivo é estudar a conexão entre essas duas disciplinas, estabelecendo as bases teóricas de uma ciência de economia de energia (TORRES; VALERO, 2000).

A Termoeconomia tem bases teóricas da Segunda Lei da Termodinâmica, conectando a física e a economia. Com a análise econômica é possível calcular os custos

dos investimentos, de manutenção, dos combustíveis sem fornecer meios para alocar os custos aos respectivos produtos. Já a análise termodinâmica calcula a eficiência do processo, localizando e quantificando as irreversibilidades, porém não avaliam a sua significância em termos do processo de produção global (CARVALHO, 2011).

A Teoria do Custo Exergético (TCE) é uma importante ferramenta da Termoeconomia que analisa o processo de formação dos custos, contabilizando sua aquisição, diagnosticando e valorizando o impacto nos recursos de avarias e otimizando componentes individuais e globais de um sistema térmico. A TCE baseia-se no conceito de exergia (Segunda Lei da Termodinâmica - SLT), no conceito de Recurso¹-Produto e na formulação matemática de um sistema térmico (VALERO *et al.*, 1986; LOZANO *et al.*, 1989; LOZANO; VALERO, 1993; VALERO *et al.*, 1994; TORRES; VALERO, 2000; VALERO; TORRES, 2006; VALERO *et al.*, 2006).

2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA, EXERGIA, EFICIÊNCIA

A SLT formula que não existe processo natural reversível, isto é, todo processo gera perdas de recursos energéticos. Existem dois enunciados clássicos da Segunda Lei (VAN WYLEN *et al.*, 2003): i) o enunciado de Kelvin-Planck menciona que é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico; e ii) o enunciado de Clausius dita que é impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.

Segundo Van Wylen *et al.* (2003) a exergia, também chamada de disponibilidade, é o máximo trabalho que pode ser realizado por um sistema ausente da presença de energia transferida na forma de calor. A exergia total associada a um fluxo de matéria é dada pela soma das componentes física, química, cinética e potencial; no entanto, devido às energias cinéticas e potências poderem ser completamente convertidas em trabalho, elas possuem valores de exergia equivalentes (DINCER; ROSEN, 2013), (DINCER *et al.*, 2014). Portanto, a exergia total da matéria, incluindo as componentes físicas e químicas e considerando componentes potenciais e cinéticas, insignificantes, é dada pela Equação 2.1:

¹ O original em inglês é *Fuel*, mas aqui optou-se por usar a denominação "Recurso" para diferenciar da tradução literal "Combustível". As equações, porém, mantêm a letra "F" do original em inglês, para facilitar a compreensão e comparação de resultados.

$$B_f = (H - H_0) - Temp_0(S - S_0) - \sum \mu_i(N_i - N_{i,0}) \quad (2.1)$$

onde N_i representa o número de moles da componente química do fluxo e μ_i seu potencial químico. O sub-índice – 0 – representa o valor dessas magnitudes nas condições do estado de referência. A entalpia e entropia são representadas por H, S.

A exergia é responsável pela qualidade da energia, uma propriedade termodinâmica adequada para a alocação dos custos. Uma vez definido o ambiente de referência a equivalência entre diferentes fluxos de energia ou matéria de uma instalação torna-se possível através da exergia (VALERO; TORRES, 2006); *i.e.* é uma base termodinâmica comum.

A exergia permite que as irreversibilidades de um sistema associado a uma mudança de estado sejam quantificadas em termos de capacidade de gerar trabalho perdido. Quanto menores forem às irreversibilidades, melhor será o desempenho do sistema, ou seja, menos trabalho é necessário para executar a mesma tarefa. Assim, é necessário alta eficiência de exergia para salvar recursos naturais (por exemplo, reservatórios disponíveis) (DEWULF, 2016).

Porém somente uma análise exergética não é suficiente para obter todos os custos de uma instalação. De acordo com Torres e Valero (2000), é necessário uma análise adicional do processo para identificar, quantificar e valorizar a irreversibilidade presente em um processo de produção. A função termodinâmica chamada “custo exergético” quantifica a exergia necessária para gerar um fluxo de exergia (VALERO *et al.*, 1986; LOZANO *et al.*, 1989; LOZANO; VALERO, 1993; VALERO *et al.*, 1994; TORRES; VALERO, 2000; VALERO; TORRES, 2006; VALERO *et al.*, 2006). As relações funcionais entre as componentes e os fluxos e a eficiência exergética estão intimamente relacionadas com o custo exergético.

Conforme abordado anteriormente, a entrada de exergia de um sistema que executa um processo será sempre menor que a saída de exergia (a exergia é sempre destruída, ou seja, a geração de entropia):

$$(\text{Exergia que entra}) - (\text{Exergia que sai}) = \text{Irreversibilidade} > 0 \quad (2.2)$$

Ou para uma unidade produtiva de um sistema complexo:

$$\text{Recursos (F) - Produtos (P) = Irreversibilidade (I) > 0} \quad (2.3)$$

sendo F e P fluxos de exergia, o que garante sua universalidade e auxilia na determinação da perda de qualidade durante o processo.

De acordo com a Lei de Gouy-Stodola existe uma relação entre a irreversibilidade gerada pelo processo (I) e o conceito de entropia gerada (S_g), definida em (TORRES; VALERO, 2000):

$$I = Temp_0 S_g \quad (2.4)$$

onde $Temp_0$ representa a temperatura do estado de referência.

Segundo Lozano e Valero (1993) o fator primordial para uma teoria de produção é o conceito de eficiência, pois o desejo de se produzir alguma utilidade é externa ao sistema. Sabe-se que não existe nenhuma máquina perfeita, e o grau de perfeição é definido pela eficiência (η), dada por:

$$\text{Eficiência } (\eta) = \frac{\text{Unidades de obtido (P)}}{\text{Recursos utilizados para obtê-lo (F)}} \quad (2.5)$$

onde o valor da eficiência estará compreendido entre zero e um para sistemas produtivos.

A definição dos produtos e dos combustíveis de uma unidade responsável por um determinado processo não é uma questão trivial. Esta informação é obtida a partir da estrutura produtiva do sistema e pode incluir sanções por destruição de exergia, resíduos descarregados no meio ambiente e emissão de poluentes.

2.3 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS CUSTOS

Um processo produtivo ou industrial é composto por um conjunto de equipamentos e produtos funcionais (matéria prima) em que ocorrem procedimentos de fabricação de outros produtos funcionais a partir da utilização de produtos manufaturados. Porém estes processos também produzem resíduos, produtos não desejados que demandam uma atenção especial no ponto de vista da valorização de energia.

Toda teoria termoeconômica (TORRES; VALERO, 2000; FRANGOPOULOS, 2009; VALERO *et al.*, 1986; LOZANO; VALERO, 1993; VALERO *et al.*, 2006; TORRES, *et al.*, 2008 *apud* LOURENÇO, 2016) depende, invariavelmente, da estrutura produtiva definida para o sistema. A definição da estrutura produtiva pode ser um passo formal da teoria, representada graficamente, ou será apresentada intrinsecamente nas equações usadas para cada componente. A aplicação sistemática da Primeira e da Segunda Leis da Termodinâmica (PLT e SLT, respectivamente) usando a estrutura produtiva de um determinado sistema permite a determinação da quantidade de exergia necessária para a produção de todos os fluxos de exergia envolvidos no sistema avaliado, ou seja, o custo de exergia dos fluxos de exergia. Os fluxos de exergia que requerem grandes quantidades de exergia (recurso) tem alto custo de exergia. Por outro lado, os fluxos de exergia que requerem uma entrada de exergia (recurso) perto de sua própria exergia tem baixo custo de exergia (perto de 1kJ/kJ).

O primeiro passo na investigação das possíveis economias de energia em um processo é estudar onde ocorre cada irreversibilidade (aumento do custo de exergia) e relacioná-lo com seu efeito sobre o consumo de recursos (TORRES; VALERO, 2000). Neste contexto, o foco não é sobre a exergia B contida em um produto funcional, mas sim pelo seu custo, que é expresso por B* (TORRES; VALERO, 2000):

$$B^* = B + \sum_{\text{processo}} I \quad (2.6)$$

onde B* é o custo exergético de um produto funcional expresso em termos de exergia.

Segundo Lozano *et al.* (1989) a eficiência e o custo possuem a mesma base conceitual, então é possível aproximar ambos os conceitos e chegar a conclusão que a inversa da eficiência é o consumo de exergia exigida por uma instalação para gerar a unidade de exergia do produto.

$$\frac{1}{\eta} = k = \frac{F(\text{unidades de exergia})}{P(\text{unidades de exergia})} = k^* \quad (2.7)$$

onde k representa o custo exergetico unitário; isto é, o quociente entre a exergia necessária para fabricar o produto desejado e o custo ou consumo mínimo correspondente ao processo ideal. Logicamente $k \geq 1$, a igualdade corresponde a um processo reversível.

Desse modo o custo exergetico por unidade de exergia requerida é dado por:

$$B^* = k^* B \quad (2.8)$$

Existe um conjunto de regras de aquisição de custos conhecidas como proposições recurso-produto para determinar os custos de exergia associadas aos fluxos de exergia em uma instalação. A TCE é definida a partir dessas regras (LOZANO *et al.*, 1989; LOZANO; VALERO, 1993; TORRES; VALERO, 2000; VALERO *et al.*, 1986; VALERO *et al.*, 1994; VALERO; TORRES, 2006; VALERO *et al.*, 2006; VALERO, 2009; VALERO *et al.*, 2017):

(P1) O custo exergetico dos fluxos depende dos custos dos recursos de entrada do sistema. Em ausência de aquisições externas, o custo dos fluxos de entrada do sistema é igual a sua exergia, ou seja, seu custo exergetico unitário é um.

(P2) O custo do produto de cada componente é igual à soma do custo exergetico dos fluxos que constituem o combustível de cada componente: $F^* = P^*$. Logo, todos os custos gerados no processo produtivo devem ser incluídos no custo final dos produtos. Em ausência de aquisições externas o custo dos fluxos de perdas é nulo.

(P3) Se o produto de um componente é formado por vários fluxos de mesma qualidade termodinâmica todos eles têm o mesmo custo exergetico unitário. Essa proposição se baseia no fato de que em equipamentos onde se identificam vários produtos, se supõe que seu processo de formação tenha sido o mesmo, tenham o mesmo custo exergetico unitário e por outro lado atribuí-se seu custo exergetico proporcional a exergia que os constituem.

2.4 TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO

A partir do exposto anteriormente é possível verificar o estabelecimento de uma cadeia lógica de conceitos que permite conectar a física com a economia e melhorar o entendimento da Termoeconomia, mostrado na Figura 2.1.

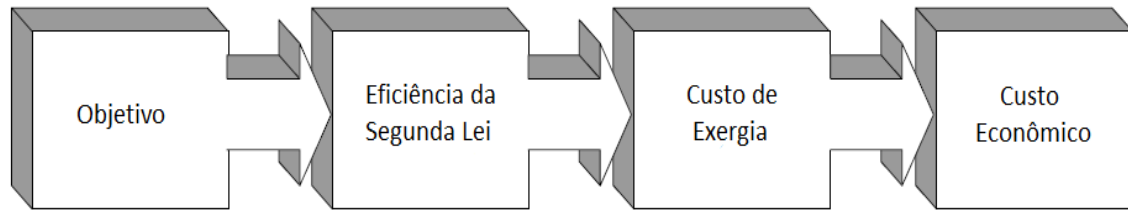


Figura 2. 1 - Cadeia lógica de conceitos termoeconômicos (VALERO; TORRES, 2006).

Nesse mesmo contexto Torres e Valero (2000) mencionaram três condições básicas para construção de uma teoria de custos:

- A definição dos limites do sistema e dos custos dos recursos de entrada no sistema são sempre relativa ao sistema em estudo. Por isso as informações sobre os custos/preços dos recursos energéticos e econômicos postos a disposição do sistema, e dentro dos limites de análise, devem ser conhecidos.
- O nível de agregação fornece uma análise da irreversibilidade total de um processo e seus componentes. A eleição do nível de agregação afeta as conclusões da análise. De fato, se não dispomos de mais informações sobre o sistema que é definido pelo seu nível de agregação, não podemos pedir ao conjunto dos custos obtidos mais informações do que temos introduzido.
- A eficiência é o indicador da qualidade dos componentes do sistema, onde se localizam as irreversibilidades. Eficiência e irreversibilidade devem estar relacionadas entre si e ao resto das variáveis técnicas e econômicas que lhes afetam.

A aplicação da Teoria do Custo Exergético a sistemas em geral, segundo Lozano e Valero (1993) possibilita:

- (i) Analisar a irreversibilidade ou ineficiência de um sistema, não importando o quanto complexo é este sistema (análise exergética);
- (ii) Calcular os custos exergéticos dos fluxos internos e dos produtos finais (controle de custos);
- (iii) Avaliar o impacto no consumo de combustível causado pela operação incorreta de um dos componentes do sistema (auditoria exergética).

2.5 ESTRUTURA FÍSICA E PRODUTIVA

A estrutura física de um sistema térmico é a representação real da relação entre os equipamentos que o compõem e o ambiente externo (entorno) através dos diferentes fluxos termodinâmicos. Essa estrutura é única, assim, dependendo da análise, se consideram diferentes níveis de agregação, ou seja, não são obrigatórios os componentes reais de um sistema coincidirem com o modelo físico. Deste modo, componentes do modelo físico podem englobar vários componentes do sistema ou vice versa (SOTOMONTE, 2009).

O estabelecimento desse modelo é necessário para a análise termoeconômica, pois a partir dessa estrutura se estabelece as propriedades características (pressão, temperatura, entropia, entalpia, exergia...) dos fluxos principais que caracterizam seus estados termodinâmicos (MARCUELLLO, 2000).

A Figura 2.2 mostra a estrutura física de um ciclo Rankine simples composto por quatro equipamentos principais: caldeira; turboalternador (turbina + alternador); condensador; bomba de alimentação.

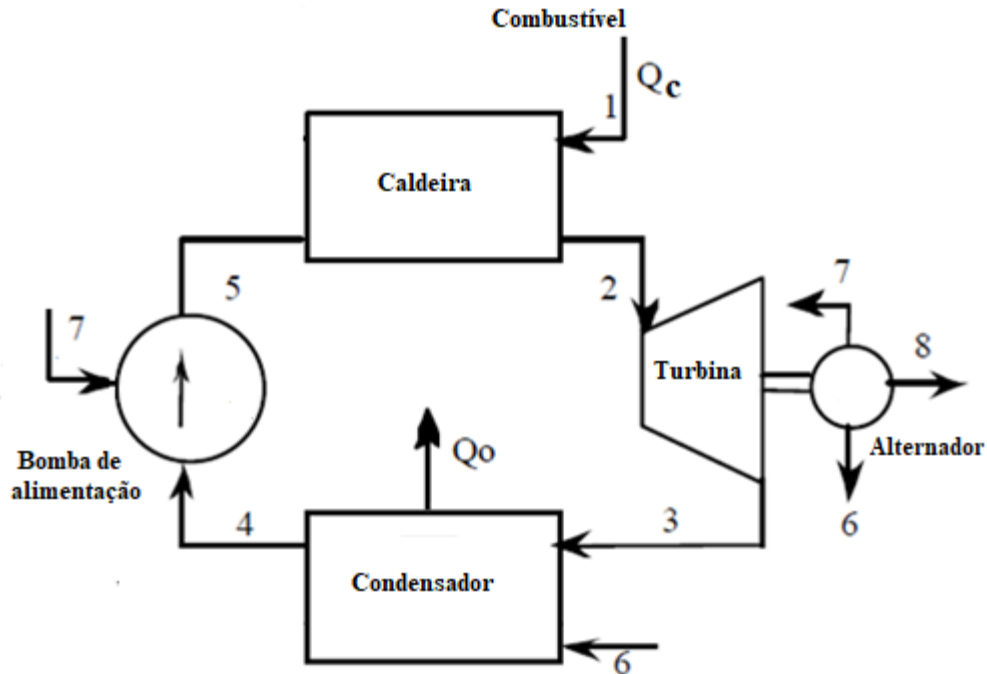


Figura 2. 2 - Estrutura física de um ciclo Rankine simples. (Fonte: Modificado de TORRES; VALERO, 2000)

Para se fazer a quantificação dos custos dos fluxos principais do sistema térmico é preciso definir um modelo termoeconômico que considere o propósito protutivo dos subsistemas do processo e a distribuição dos recursos através da planta (SOTOMONTE, 2009). Entretanto, apenas com o conhecimento da estrutura física não é possível realizar essa análise termoeconômica. O conhecimento da estrutura produtiva se faz necessário, pois ele fornece um conjunto de equações de custos que representa matematicamente o processo de formação dos custos (SANTOS, 2009).

Diferente da estrutura física a estrutura produtiva pode conter um número de unidades ou equipamentos. Ela não é única, podendo ser construídas diversas estruturas produtivas de acordo com a definição recurso-produto e da distribuição de recursos entre os componentes. Segundo Palacio (2010) a estrutura produtiva se compõe de duas partes, um real (unidades físicas ou combinação delas, representadas por retângulos) e uma fictícia (junções e separações, representadas por triângulos/losângulos e círculos, respectivamente) que se intere-relacionam a partir das seguintes condições:

- (i) cada unidade real tem um único produto e um único recurso;
- (ii) as junções têm a função de converter produtos de unidades anteriores em recursos para a próxima unidade;
- (iii) as separações ramificam o produto de uma unidade para ser usado como recurso de duas ou mais outras unidades;
- (iv) todos os recursos que entram na planta devem refletir no custo final dos produtos.

A estrutura produtiva do ciclo Rankine da Figura 2.2, conforme a TCE, é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 - Estrutura produtiva do ciclo Rankine

Equipamentos	Recurso	Produto
Caldeira	Q_C	$B_2 - B_5$
Turboalternador	$B_2 - B_3$	$P_6 + P_7 + P_8$
Condensador	$P_6 + B_3$	$B_4 + (Q_0 = B_3 - B_4)$
Bomba de alimentação	P_7	$B_5 - B_4$
Ciclo Rankine	Q_C	P_8

Segundo Torres e Valero (2000) a exergia de calor dissipado (Q_0) é dado por:

$$B_{Q_0} = \sum_j \rho_{3j} B_9 \quad (2.9)$$

Onde os coeficientes ρ_{3j} representam a razão entre a variação da entropia gerada em cada equipamento e a variação da entropia gerada no condensador, conforme as Equações (2.10), (2.11) e (2.12).

$$\rho_{31} = \frac{s_2 - s_5}{s_3 - s_4} \quad (2.10)$$

$$\rho_{32} = \frac{s_3 - s_2}{s_3 - s_4} \quad (2.11)$$

$$\rho_{34} = \frac{s_5 - s_4}{s_3 - s_4} \quad (2.12)$$

O produto do condensador (Q_0) deve ser alocado para os equipamentos correspondentes, ou seja, aos que provocam aumento de entropia do fluido de trabalho. Então se observa que $\rho_{31} + \rho_{32} + \rho_{34} = 1$.

A partir da Equação (2.8) é possível formular o balanço de custo para cada componente necessário para a obtenção dos custos exergéticos unitários dos fluxos físicos internos de exergia total, dado por:

$$\sum (k_i \cdot B_i) = 0 \quad (2.13)$$

Sendo, por convenção, atribuídos valores positivos para fluxos de entrada e valores negativos para fluxos de saída (SANTOS, 2009). O zero representa o fluxo financeiro devido investimentos de operação e manutenção que é considerado no custo monetário unitário, conforme a equação abaixo:

$$\sum (c_i \cdot B_i) = Z_m \quad (2.14)$$

Assim como no custo exergético é possível escrever uma relação entre o custo monetário com o custo monetário unitário, dada por:

$$C_i = c_i \cdot B_i \quad (2.15)$$

Também chamado de custo termoeconômico o custo monetário é a quantidade de recursos monetários externos necessários para a produção de um fluxo (SANTOS, 2009).

Porém, o balanço de custo não é suficiente para a determinação dos custos exergéticos do sistema, juntamente com as proposições citadas anteriormente são formuladas equações auxiliares que completam o conjunto de equações necessárias para determinação de todas as incógnitas do balanço.

2.6 ASCENDANCY

Todos os seres vivos crescem se desenvolvem e morrem. Isso é verdadeiro para organismos e órgãos tomados em macro-escala como estruturas sociais: empresas, movimentos culturais, comunidades econômicas e ecossistemas. Esses órgãos são abstrações criadas para descrever os diversos fenômenos e, se elaboradas de forma quantitativa, permitem o cálculo das taxas e a previsão do comportamento do sistema, auxiliando na solução de problemas.

Para os ecossistemas, Odum (1969) descreveu 24 atributos (Tabela 2.2) conectados a fluxos internos, ao controle da retro-alimentação (*feedback*) e ao crescimento da diversidade. Essa evolução termodinâmica permite medir o grau de maturidade dos ecossistemas, além de verificar o desempenho de cada componente, melhorando a gestão de populações naturais.

Tabela 2. 2 - Atributos da sucessão ecológica: tendências esperadas no desenvolvimento de ecossistemas (ODUM, 1969)

Atributos dos ecossistemas	Em desenvolvimento	Maduro
Energia da comunidade		
1 – Produção 1ª Total / Respiração	< 1 >	= 1
2 – Produção 1ª Total / Biomassa	Alta	Baixa
3 – Biomassa / Total de Fluxos	Baixa	Alta
4 – Produção Líquida /Rendimento	Alta	Baixa
5 – Cadeia Trófica	Linear (“grazing”)	Teia de Aranha (detritos)
Estrutura da comunidade		
6 – Materia Orgânica Total	Pequena	Grande
7 – Nutrientes Inorgânicos	Extra-biótico	Intra-biótico
8 – Diversidade (riqueza)	Baixa	Alta
9 – Diversidade (equitabilidade)	Baixa	Alta
10 – Diversidade Bioquímica	Baixa	Alta
11 – Estratificação	Pouco organizada	Muito e organizada
Historia de Vida		
12 – Especialização de Nicho	Ampla	Pouca
13 – Tamanho do Indivíduo	Pequeno	Grande
14 – Ciclos de Vida	Curto, simple	Largo, completo
Ciclo de Nutrientes		
15 – Ciclos de Minerais	Aberto	Fechado
16 – Troca de Nutrientes	Rápido	Lento
17 – Regeneração de Nutrientes	Sem importância	Importante
Pressão de Seleção		
18 – Forma de Crescimento	“r” - rápido	“k”
19 - Produção	Quantidade	Qualidade
Homeostasis Total		
20 – Simbiose Interna	Pouco desenvolvida	Desenvolvida
21 – Conservação de Nutrientes	Pobre	Boa
22 – Estabilidade (resist a perturbação externa)	Pobre	Boa
23 – Entropia	Alta	Baixa
24 – Informação	Baixa	Alta

Uma propriedade emergente é consequência dos processos autorreguladores sendo, portanto, dependente das inter-relações dos sistemas. Se a frase “o todo é maior que a soma das partes” é correta, então a “emergência” se constitui no “maior” (MÜLLER, 1997). Isso

é a essência da filosofia holística e se o ecossistema somente pode ser entendido como um “todo” será caracterizado por propriedades macroscópicas.

Os sistemas ecológicos podem ser analisados por gráficos e redes tróficas e, então, são tratados com técnicas como as de Odum. Complementar a isso, os ecossistemas são vistos como estruturas dissipativas que se constroem através de fluxos que, por sua vez, são consequência da função termodinâmica do sistema e vice-versa (NIELSEN; ULANOWICZ, 2000).

Para simular o ecossistema como um todo é necessário conhecer um conjunto de parâmetros, representando o “pool gênico” do sistema, e ter um algoritmo operando sobre esses parâmetros, para assim encontrar os que melhor se ajustam com a *meta* do sistema. Esse algoritmo é também chamado de *goalfunction* – aqui traduzido para função-meta.

As funções-meta atuam como indicadores de qualidade de um ecossistema, consistindo nas propriedades emergentes resultantes dos processos de auto-organização e determinando a direção do desenvolvimento. Muitas funções-meta são usadas para avaliar ecossistemas, destacando-se o *Ascendancy* (ULANOWICZ, 1999a), a Exergia (JØRGENSEN, 1999) e a Emergia (BROWN; MCCLANAHAN, 1996).

2.6.1 Formulação Matemática

Segundo Nielsen & Ulanowicz (2000), K. R. Popper introduziu uma nova forma de ver o mundo, visto como um mundo de propensões, e não em termos de forças determinísticas. Brevemente, uma propensão é a tendência em que ocorre certo evento em um contexto particular. Fenômenos observados são considerados resultados de eventos coincidentes que possuem distribuição não-equiprovável. Ou seja, o mundo não se comporta como um jogo de dados ou como um jogo de moeda, onde todos os resultados têm a mesma probabilidade de 1/6 ou 1/2, respectivamente. Em vez disso se comporta como um jogo em que as moedas e os dados estão adulterados. Além disso, as probabilidades mudam com interações mutuas entre elas, ou seja, as probabilidades não são estacionárias. Toda probabilidade torna-se condicional quando rodeada de eventos.

Considerando o exemplo de Ulanowicz (1999b), na Tabela 2.3, que mostra o número de vezes que cada causa (a_1 , a_2 , a_3 ou a_4) é seguido por cinco resultados possíveis (b_1 , b_2 , b_3 , b_4 ou b_5).

Tabela 2. 3 - Tabela de frequências hipotéticas para um número de ocorrências conjuntas entre quatro causas (a_n) e cinco resultados (b_n)

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	Soma
a_1	40	193	16	11	9	269
a_2	18	7	0	27	175	227
a_3	104	0	38	118	3	263
a_4	4	5	161	20	50	241
Soma	166	206	215	176	237	1000

Dos 1000 eventos da Tabela 2.3, percebe-se que a probabilidade conjunta, por exemplo, de a_3 e b_5 ocorrem juntos é $p(a_3, b_5) = 3/1000$. No entanto, a probabilidade conjunta não é o mesmo que a probabilidade condicional. Para calcular é necessário normalizar a probabilidade conjunta pela probabilidade $p(a_3)$ (indicando que a_3 ocorre em qualquer circunstância): $p(b_5|a_3) = p(a_3, b_5) / p(a_3)$. Pela coluna da direita (soma), $p(a_3) = 263/1000$. Assim, a probabilidade condicional $p(b_5|a_3) = 3/263$.

Observando a Tabela 2.3, percebe-se que quando a_1 ocorre, existe uma alta probabilidade de que b_2 seguirá. De modo parecido, b_5 é provável que ocorra quando a_2 tenha acontecido e b_3 quando se tem a_4 . A situação não é tão clara de se seguir a partir de a_3 , mas b_1 e b_4 são mais prováveis. Presumivelmente, se fosse possível isolar os fenômenos, então cada vez que a_1 ocorresse estaria seguido por b_2 . Os resultados do isolamento hipotético estão na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4 - Tabela de frequências, igual à Tabela 2.3, mas isolando as causas

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	Soma
a_1	0	269	0	0	0	269
a_2	0	0	0	0	227	227
a_3	263	0	0	0	0	263
a_4	0	0	241	0	0	241
Soma	263	269	241	0	227	1000

De modo interessante, b_4 nunca ocorre em condições isoladas. Surge puramente como resultado de interferências entre as propensões. Conclui-se que, segundo Ulanowicz (1999b), sempre que as propensões ocorrem em proximidade, apareceram interferências e novas propensões.

Restrições devem ser agregadas de maneira a “organizar” a configuração indeterminada da Tabela 2.3, obtendo assim a Tabela 2.4. Ou seja, a transição da configuração “solta” para seu homólogo rígido é um exemplo de “organização” (SKYRMS, 1980 *apud* ULANOWICZ, 1999b).

2.6.2 Autocatálise

O *feedback* positivo (Mutualismo) entre dois processos é responsável em grande parte da organização e estrutura que percebe-se nos ecossistemas vivos. A Autocatálise é uma forma de Mutualismo. Ela consiste em um encadeamento cíclico de processos onde cada membro tem o propósito de acelerar a atividade do evento seguinte. É importante destacar dois pontos sobre os ciclos autocatalíticos: i) os membros nem sempre estão conectados de forma rígida, ou seja, a ação de um não tem que necessariamente aumentar o outro, em qualquer instante, apenas a maior parte do tempo; ii) os membros dos ciclos são capazes de variar.

A Figura 2.3 mostra um exemplo do crescimento e desenvolvimento de um sistema com Autocatálise. A partir da influência da autocatálise algumas articulações tornam-se menos importantes ou até mesmo desaparecem. Um maior nível de atividade é canalizada entre as formas mais eficazes.

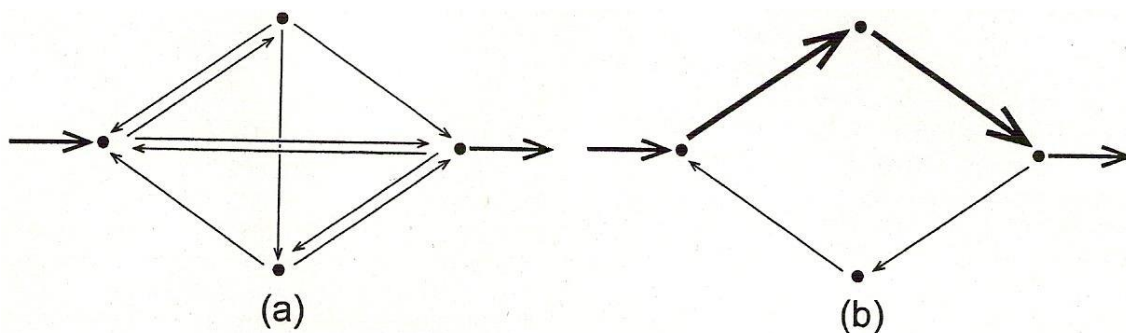


Figura 2. 3 Representação esquemática dos efeitos da autocatálise em um sistema. (Fonte: ULANOWICZ, 1999b)

2.6.3 Crescimento, desenvolvimento e *Ascendancy*.

Os conceitos de crescimento e desenvolvimento são diferentes, pois enfatizam aspectos diferentes de um processo. Crescimento destaca o aumento do tamanho ou

atividades de um sistema, por outro lado, desenvolvimento realça a crescente organização do sistema.

A natureza extensiva do crescimento é facilmente quantificável. A medida da atividade total do sistema é a soma de todos os intercâmbios, T . Assim:

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij} \quad (2.16)$$

Onde T_{ij} representa a magnitude de quantificar transferência de material ou energia entre um doador (presa) i e um receptor (predador) j .

Para quantificar o desenvolvimento tem que quantificar a transição do estado (a) ao (b) da Figura 2.3 (começando por um sistema “solto” altamente indeterminado, para outro em que os fluxos estão restringidos aos caminhos mais efetivos). Citando Boltzmann (1872 *apud* ULANOWICZ, 1999b), se quantifica a incerteza, inc_j , de uma categoria j , como:

$$inc_j = -k \log[p(B_j)] \quad (2.17)$$

Onde $p(B_j)$ é a probabilidade de que B_j ocorra e k é uma constante escalar.

As restrições eliminam as incertezas, e assim as incertezas de um sistema com restrições será menor que a de um sistema “solto”. Supondo que um evento A_i exerça uma restrição sobre a ocorrência de B_j . A probabilidade de que B_j ocorra é por definição a probabilidade condicional $p(B_j|A_i)$, de modo que a incerteza de B_j sob influência de A_i é

$$inc_j^* = -k \log [p(B_j|A_i)] \quad (2.18)$$

A medida da intensidade da restrição que A_i exerce sobre B_j pode ser calculada como

$$inc_j - inc_j^* = -k \log [p(B_j|A_i) / p(B_j)] \quad (2.19)$$

Esta medida de restrição entre qualquer par arbitrário A_i e B_j pode ser utilizada para calcular a quantidade de restrição inerente ao sistema como um todo, ponderando a restrição mútua entre cada par de eventos mediante a probabilidade conjunta associada e

estes elementos, e somando sobre todos os pares possíveis. Assim se produz o resultado de que

$$inc_j - inc_j^* = k \sum_i \sum_j p(A_i, B_j) \log \left(\frac{p(A_i, B_j)}{p(A_i)p(B_j)} \right) \quad (2.20)$$

Para poder aplicar $inc_j - inc_j^*$ na avaliação do nível de restrição de um ecossistema tem que estimar $p(A_i, B_j)$. Considerando que T_{ij} é o fluxo que sai de i e entra em j ; nesse aspecto se pode considerar T_{ij} como dados de uma matriz quadrada de eventos. As probabilidades conjuntas podem ser estimadas por T_{ij}/T e as probabilidades simples serão as somas normalizadas das linhas e colunas:

$$p(A_i) \approx \frac{\sum_j T_{ij}}{T} \quad (2.21)$$

$$p(B_j) \approx \frac{\sum_i T_{ij}}{T} \quad (2.22)$$

Assim a restrição mutua média do sistema se expressa como:

$$inc_j - inc_j^* = k \sum_i \sum_j \frac{T_{ij}}{T} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{\sum_j T_{ij} \cdot \sum_i T_{ij}} \right) \quad (2.23)$$

O objetivo é capturar tanto as consequências extensivas como as intensivas da autocatálise em uma única medida, assim segundo Tribus e McIrvine (1971 *apud* ODUM, 1969) se considera $k = T$ e as dimensões de $inc_j - inc_j^*$ contêm as unidades usadas para medir os intercâmbios. Como a escala de medida agora (depois de substituir $k = T$) é qualitativamente diferente, Ulanowicz (1980 *apud* ULANOWICZ, 1999b) propõe o nome de *Ascendancy*. Assim, *Ascendancy* mede o tamanho e o estado de organização de uma rede de intercâmbios que ocorrem em um ecossistema. Segundo Ulanowicz (2004), em

ausência de grandes perturbações externas, os sistemas vivos tendem a se organizar, exibindo uma propensão natural para aumentar seu *Ascendancy* (aumentar a ordem), que então se caracteriza como uma função-meta capaz de unificar quase todos os 24 atributos de Odum (1969).

A Teoria do *Ascendancy* pode também ser usada em outros campos. Em redes neurais, por exemplo, o *Ascendancy* mede a habilidade da rede para interpretar padrões e estímulos (BOSWORTH, 1991).

2.7 ESTADO DA ARTE

Nos dias atuais a análise termoeconômica tem cada vez mais conquistado espaço em relação às análises puramente exergéticas. Agregando fundamentos da Segunda Lei da Termodinâmica (exergia) e elementos de análise econômica (custos) essa análise tem como um de seus objetivos a conservação e uso racional da energia, minimizando custos operacionais e irreversibilidades.

Um dos pioneiros a adotar o conceito de exergia para a análise de custo foi Keenan, em 1932, nos Estados Unidos (BALESTIARI *et al.*, 1999). Esse tipo de análise impulsionou o surgimento de metodologias voltadas a processos térmicos que visaram avaliar as irreversibilidades de um equipamento isolado levando em consideração o restante dos equipamentos através do conceito de custo exergético. Desse modo surgiu a Termoeconomia, a partir da combinação de análises termodinâmica e econômica e da relação entre o custo exergético e o custo monetário (CERQUEIRA, 1999).

O consolidamento e amadurecimento da área ocorreram no período das décadas de 80 e 90 com o aparecimento de metodologias como a Análise Funcional Termoeconômica (AFT), a Teoria do Custo Exergético (TCE), a Exergoeconomia, entre outras.

Lozano *et al.* (1989) apresentou a teoria do custo exergético, uma das grandes contribuições para a termoeconomia, mostrando sua aplicação prática em uma planta de cogeração na indústria açucareira. Em Lozano e Valero (1989) essa nova metodologia de análise termodinâmica foi aplicada ao diagnóstico energético através de testes de rendimento.

Deste período até os dias atuais vários trabalhos têm aplicado a TCE para o diagnóstico energético de processos e sistemas complexos. Campo (1999) avaliou um sistema de cogeração de uma usina de açúcar e álcool termoeconomicamente para

determinar os custos dos principais fluxos do sistema em três anos diferentes. Aplicando a TCE ele verificou o comportamento destes custos diante de variações na eficiência das caldeiras e no preço do combustível.

Guarinello *et al.* (2000) na busca de determinar os custos de produção de eletricidade e vapor em um sistema projetado de cogeração de turbina a gás injetado aplicou a TCE. A usina em questão tem o objetivo de fornecer demandas térmicas e elétricas a um distrito industrial na região de Pernambuco.

Misra *et al.* (2002) obteve uma configuração de projeto próximo do ideal ao determinar os custos econômicos de todos os fluxos internos e produtos de um sistema de refrigeração por absorção de vapor LiBr/H₂O administrado por água quente pressurizada para aplicações de ar condicionado.

Rücker (2005) analisou a alocação de custos exergéticos e a otimização de parâmetros operacionais e construtivos de uma planta de cogeração baseada em microturbina a gás natural e refrigeração por absorção utilizando a TCE. Após o processo de otimização obteve uma redução nos custos de investimento e nos custos exergoeconômicos. Assim pode constatar que a teoria aplicada é uma importante ferramenta na localização e formação dos custos produtivos e na otimização de sistemas térmicos.

Takaki (2006) e Fiomari *et al.* (2006) realizaram uma análise termoeconômica a partir da TCE com a intenção de examinar os reflexos dos custos de investimento de capital e do combustível em relação à composição dos custos dos produtos em plantas de cogeração e geração de energia da indústria frigorífica e uma planta de expansão do sistema de cogeração de energia da Destilaria Pioneiros, respectivamente.

Alves (2007) verificou uma boa flexibilidade de otimização de processos ao aplicar duas metodologias (TCE e a Análise Funcional, AF) ao analisar exergoeconomicamente dois processos básicos de produção de hidrogênio.

Silva e Silva (2010) ao estudar a Usina Termelétrica Drax que opera com carvão mineral pulverizado em Yorkshire na Inglaterra executou uma análise termoeconômica baseada na TCE na qual possibilitou localizar e quantificar os equipamentos menos eficientes e que eventualmente devem ser melhorados em projetos futuros.

Na década de 80 até os dias atuais, funções emergentes como *Ascendancy* e *exergia*, tentam sintetizar as informações sobre fluxos de energia e biomassa em relação a um estado de clímax teórico (ANGELINI, 1999).

A função meta, *Ascendancy*, é baseada na teoria de Ulanowicz (1986). O *Ascendancy* foi desenvolvido com a finalidade de determinar a maturidade de um ecossistema, esse amadurecimento é decorrente do aumento do fluxo de energia e das interações existentes. Logo, um ecossistema evolui quando aumenta o valor do *Ascendancy* (ANGELINI, 1999).

Christensen (1994), através do estudo de 41 modelos de ecossistemas estáticos publicados, descobriu que o *Ascendancy* é influenciado principalmente pelo fluxo de energia do sistema ao analisar o comportamento das funções meta, *Ascendancy* e exergia (quantificadores do estado de desenvolvimento dos ecossistemas).

Patten (1995) chegou à conclusão que o *Ascendancy* e a exergia e outras funções meta estão relacionadas através de uma base comum ao analisar sistemas macroscópicos em estados estacionários, mesmo essas funções serem originalmente derivadas de diferentes perspectivas sobre os ecossistemas.

Fabiano *et al.* (2004) avaliou a saúde de um ecossistema marinho através do cálculo da exergia, exergia específica e do *Ascendancy*. Após o estudo desse sistema verificou-se que em ecossistemas naturais a exergia e o *Ascendancy* apresentaram convergência e seguem tendências sazonais semelhantes.

Ulanowicz *et al.* (2006) verificou que os ecossistemas se desenvolvem de acordo com o aumento de atributos distintos do sistema, como o *Ascendancy*, o armazenamento de exergia, entre outros. A análise desses atributos mostrou uma consistência teórica entre essas tendências.

Jørgensen e Ulanowicz (2009) verificaram como o *Ascendancy*, índice de atividade e organização em sistemas vivos calculado em termos de fluxos, se comporta quando os fluxos em questão são medidos em termos de eco-exergia.

Kharrazi *et al.* (2014) através de indicadores ecológicos buscou fornecer uma base no desenvolvimento de melhores métodos para quantificar a sustentabilidade. Os métodos foram revisados com base em três critérios, a integração de dimensões ecológicas e econômicas, a resiliência de longo prazo de um sistema e a consideração de propriedades extensivas e intensivas, por exemplo, propriedades que não dependem do tamanho do sistema e propriedades que dependem, como o *Ascendancy*.

Huang e Ulanowicz (2014) realizaram um estudo de caso no sistema econômico de Beijing. Através da análise de redes ecológicas quantificaram o crescimento e

desenvolvimento de Beijing e os resultados sugeriram que a ascendência do sistema deve ser aumentada para favorecer um desenvolvimento mais sustentável.

Katharina e Henrik (2017) confirmaram a validade da ascendência como uma medida importante para a organização de um ecossistema ao estudarem a relação entre estrutura, fluxo e organização, desenvolvimento ao longo de escalas temporais evolutivas e a relação com a estabilidade do ecossistema em uma versão hierárquica do Tangled Nature Model da ecologia evolutiva.

Banerjee *et al.* (2017) utilizou alguns índices ecossistêmicos, dentre eles o Ascendancy, para analisar a robustez do sistema de reservatório de Bakreswar seguindo cenários hipotéticos de perturbação. A robustez assim como a exergia são indicadores da saúde do ecossistema e também dependem da magnitude e do tipo de estresse infligido. Após a análise concluíram que o sistema é moderadamente estável com nível de maturidade justo e é capaz de suportar o estresse em uma extensão razoável.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo inicialmente descreve-se o ciclo Rankine, objeto de estudo desta dissertação. O diagrama esquemático e os dados de funcionamento de cada um dos tipos de ciclo são descritos. Em seguida, serão apresentadas as equações gerais dos balanços de massa, energia e exergia, essenciais para uma análise exergética. Na sequência são mostrados os conceitos para a formulação da matriz Recurso-Produto (análise exergética) e do *Ascendancy*.

3.1 CICLO RANKINE

Na produção de potência o ciclo Rankine é um dos ciclos mais utilizados e estudados. Esse ciclo possui várias configurações, desde o modelo simples (ideal), mostrado na Figura 3.1, até configurações com variações que buscam o aumento do rendimento térmico do ciclo e outras melhorias que serão abordadas nas subseções seguintes.

No ciclo Rankine ideal o fluido de trabalho passa por uma série de processos internamente reversíveis (MORAN e SHAPIRO, 2006):

Processo 1 – 2: Expansão isentrópica do fluido de trabalho na turbina do estado 1 (vapor saturado) até a pressão do condensador;

Processo 2 – 3: Transferência de calor do fluido de trabalho à medida que flui a pressão constante no condensador, estado 3 (líquido saturado);

Processo 3 – 4: Compressão isentrópica na bomba para estado 4 (líquido comprimido);

4 – 1: Transferência de calor para o fluido de trabalho à medida que ele flui a pressão constante na caldeira completando o ciclo.

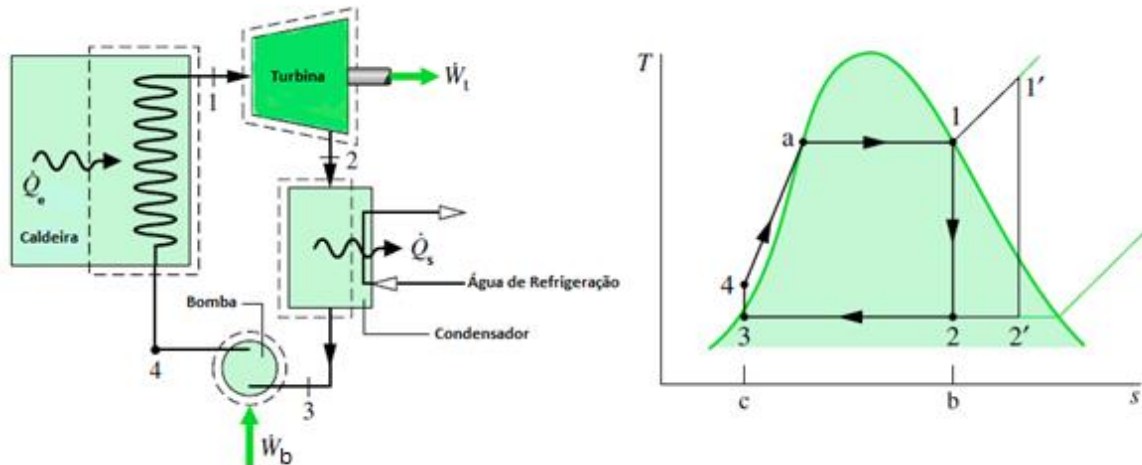


Figura 3. 1 - Unidade térmica simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine.
(Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)

Analisando o diagrama T-s é possível identificar as áreas que representam as transferências de calor e o trabalho líquido. A área (1-b-c-4-a-1) representa o calor transferido ao fluido de trabalho e a área (2-b-c-3-2) é a transferência de calor do fluido de trabalho que passa através do condensador. A área fechada (1-2-3-4-a-1) pode ser interpretada como a entrada de calor líquido ou, de forma equivalente, o rendimento do trabalho líquido (MORAN; SHAPIRO, 2006).

3.1.1 Ciclo Rankine com Sobreaquecimento

A adição de mais energia ao vapor através de transferência de calor pode ser feita por um trocador de calor, chamado de sobreaquecedor, no qual leva o vapor ao estado de sobreaquecido na entrada da turbina. O diagrama T-s da Figura 3.1 mostra que o ciclo pode apresentar um sobreaquecimento do vapor representado pela área (1'-2'-3-4-1'). Por possuir uma temperatura média de adição de calor maior que o ciclo sem sobreaquecimento a eficiência térmica do ciclo com sobreaquecimento é maior. Além disso, o sobreaquecimento também tende a melhorar a qualidade do vapor dos gases de escape da turbina e, dependendo do sobreaquecimento, esse estado de exaustão da turbina pode até cair na região de vapor superaquecido (MORAN; SHAPIRO, 2006).

A Tabela 3.1 estão expostos os dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento.

Tabela 3. 1 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento

Pressão na caldeira	8 MPa
Temperatura do vapor sobreaquecido	480°C
Pressão do condensador	0,008 MPa
Potência líquida	100 MW
Bomba e turbina	Isoentrópicos

3.1.2 Ciclo Rankine com Reaquecimento

Uma das variações citadas anteriormente que aumentam a eficiência do ciclo Rankine foi o aumento da pressão de operação no interior da caldeira. Porém esse aumento no fornecimento de calor provoca uma umidade excessiva na fase final da turbina. A solução desse problema surge com a utilização do ciclo com reaquecimento, mostrado na Figura 3.2.

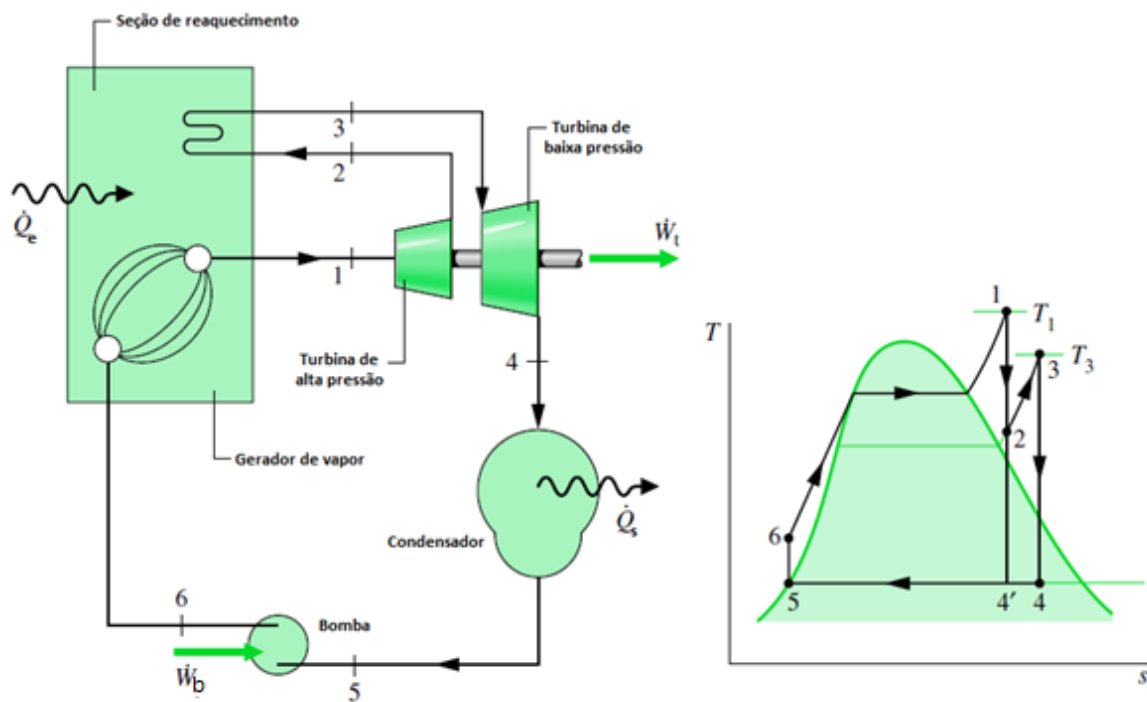


Figura 3. 2 - Ciclo com reaquecimento. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)

Nessa configuração o vapor é expandido parcialmente numa parte da turbina até uma pressão intermediária (estágio de alta pressão) e retorna a caldeira para ser reaquecido. Posteriormente o vapor é admitido na outra parte da turbina (estágio de baixa pressão) onde se expande até a pressão do condensador. Esse artifício é utilizado devido às limitações metalúrgicas que restringem a temperatura limite de operação do ciclo.

Os dados de funcionamento para o ciclo Rankine com reaquecimento estão mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com reaquecimento

Pressão na caldeira	8 MPa
Temperatura do vapor sobreaquecido	480°C
Pressão de entrada na turbina de baixa	0,7 MPa
Temperatura do vapor reaquecido	440°C
Pressão do condensador	0,008 MPa
Potência líquida	100 MW
Bomba e turbina	Isoentrópicos

3.1.3 Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

Esse pré-aquecimento regenerativo da água de entrada da caldeira melhora a temperatura média termodinâmica de aquecimento e reduz a irreversibilidade externa na caldeira. O diagrama esquemático desse ciclo está representado na Figura 3.3.

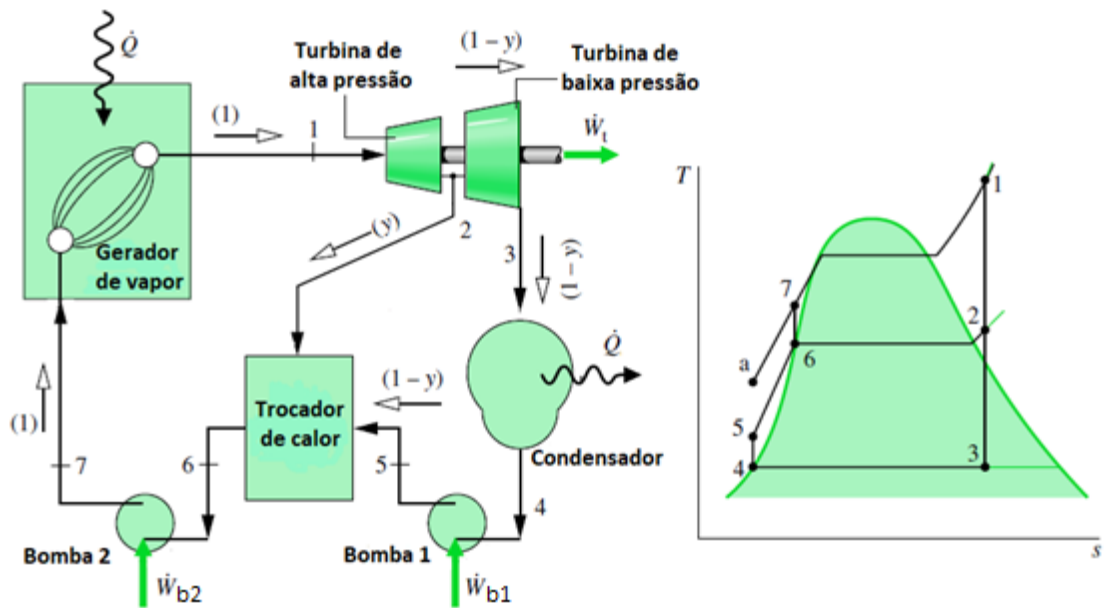


Figura 3. 3 - Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.
(Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)

Tabela 3. 3 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

Pressão na caldeira	8 MPa
Temperatura do vapor sobreaquecido	480°C
Pressão de entrada da turbina de baixa	0,7 MPa
Pressão do condensador	0,008 MPa
Potência líquida	100 MW
Bomba e turbina	Isoentrópicos

3.1.4 Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

O diagrama esquemático e dos fluxos estão representados na Figura 3.4.

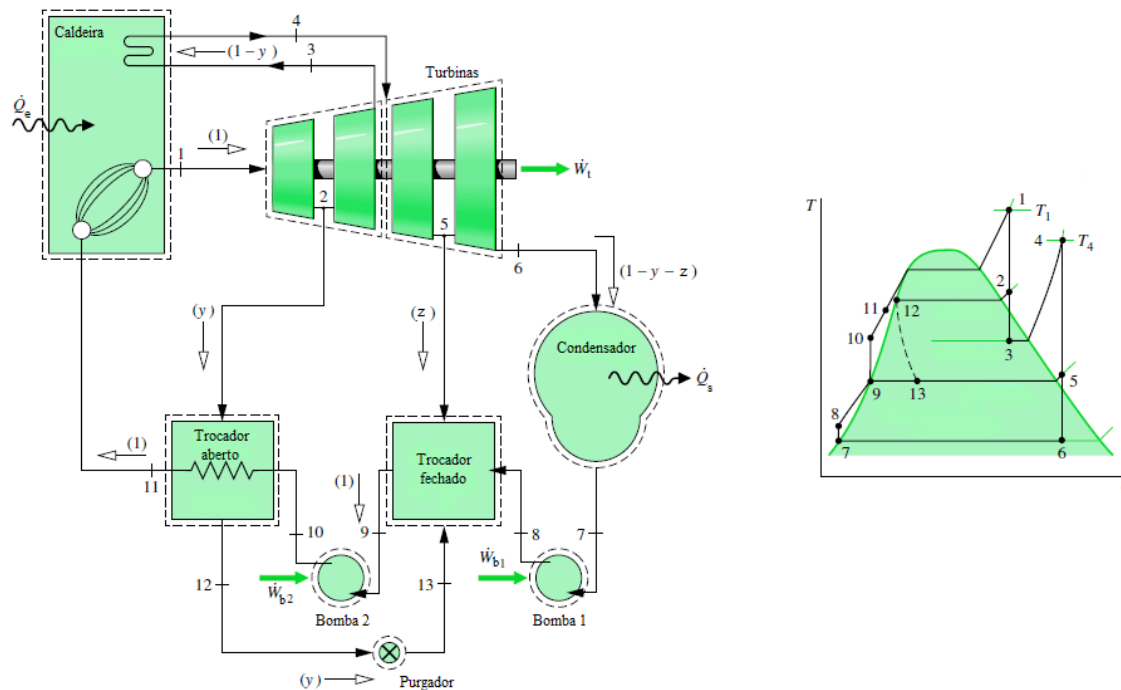


Figura 3. 4 - Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo. (Fonte: MORAN e SHAPIRO, 2006)

Tabela 3. 4 - Dados de funcionamento para o ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

Pressão na caldeira	8 MPa
Temperatura do vapor sobreaquecido	480°C
Extração de vapor na primeira turbina de baixa	2 MPa
Temperatura de saída do trocador aberto	205°C
Pressão de saída na primeira turbina de baixa	0,7 MPa
Temperatura do vapor reaquecido	440°C
Extração de vapor na segunda turbina de baixa	0,3 MPa
Pressão do condensador	0,008 MPa
Potência líquida	100 MW
Bombas e turbinas	Isoentrópicos

3.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA

Segundo Kotas (1985) o estudo de processos através de uma análise usando sistema fechado não é conveniente, uma vez que um limite do sistema não permite o fluxo de matéria através dele, sendo, assim, necessário reformular relações para torná-los diretamente aplicáveis à análise de um volume de controle.

A maioria dos processos que ocorrem na engenharia estão associados a um fluxo de massa de um componente de uma planta para outro. Portanto as equações para os balanços de massa, energia e exergia mostradas a seguir são expressões gerais definidas para volumes de controle genéricos, onde os processos ocorrem em regime permanente.

A partir desses balanços é possível conhecer o fluxo mássico em todos os componentes do sistema; o trabalho e calor gerado/consumido em cada volume de controle; eficiências energéticas e exergéticas para cada volume de controle do sistema e a irreversibilidade gerada nos volumes de controle e no sistema global (SILVA, 2004). Esta seção baseia-se em (KOTAS, 1985; VAN WYLEN *et al.*, 2003; MORAN; SHAPIRO, 2006).

3.2.1 Balanço de massa

A massa é uma propriedade conservativa, não pode ser criada nem destruída durante um processo. Em volumes de controle deve-se levar em conta a quantidade de massa que entra e sai pela superfície de controle (espécie de fronteira que delimita o volume de controle), pois a massa pode atravessar essa fronteira.

Segundo Van Wylen *et al.* (2003) a taxa de variação da massa no volume de controle é igual à somatória de todos os fluxos de massa que entram no volume de controle, através da superfície de controle, menos a somatória de todos os fluxos de massa que saem do volume de controle. Esse conceito pode ser expresso pela Equação (3.1):

$$\frac{dm_{oe}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3.1)$$

Onde $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ representam os fluxos de massa de entrada e saída do volume de controle, respectivamente; e $\frac{dm_{oe}}{dt}$ a variação de massa do objeto de estudo, ou seja, do volume de controle analisado;

Para escoamentos permanentes, durante o processo, a quantidade de massa contida dentro do volume de controle não muda com o tempo. Assim a quantidade de massa que entra em um volume de controle tem que ser igual à quantidade que sai.

3.2.2 Balanço de energia

A energia, assim como a massa, é uma propriedade que se conserva, não pode ser criada ou destruída. A Primeira Lei da Termodinâmica (PLT) é a lei que rege essa definição. Comumente chamada de lei de conservação da energia, ela relaciona as mudanças de estados detectadas em um sistema ou volume de controle às quantidades de energia, podendo ser tanto na forma de energia transferida (calor e trabalho) como na forma de energia transportada (fluxo de massa):

$$\frac{dE_{oe}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e^T - \sum \dot{m}_s h_s^T \quad (3.2)$$

Sendo $\frac{dE_{oe}}{dt}$ a taxa de variação de energia do objeto de estudo; $\dot{Q}$ e $\dot{W}$ as taxas líquidas de energia transferida por transferência de calor e trabalho, respectivamente; $\sum \dot{m}_e h_e^T$ e $\sum \dot{m}_s h_s^T$ as taxas de transferência de entalpia total dos fluxos de massa de entrada e saída do volume de controle (incluindo entalpia, energias cinética e potencial).

A PLT para um volume de controle considera a variação mássica deste volume e toda energia que essa massa traz com ela. Nos processos que ocorrem em regime permanente as propriedades podem variar de ponto para ponto, porém elas permanecem constantes em relação ao tempo para um dado ponto qualquer.

3.2.3 Balanço de exergia

A base para a aplicação de uma análise exergética é fornecida pelo balanço de exergia, juntamente com os outros dois balanços citados anteriormente. Segundo Moran e Shapiro (2006) a alteração na exergia em um volume de controle durante um processo não é igual à exergia líquida transferida, pois devido a irreversibilidades, inerentes a todo processo real, parte da exergia é destruída. Os conceitos de mudanças de exergia, transferência de exergia e destruição de exergia estão relacionados através do balanço de exergia, tanto para sistemas como para volumes de controle.

O conceito de fluxo de exergia é muito importante para o balanço da taxa de exergia de um volume de controle. Ao fluir através de uma superfície de controle a massa

provoca uma transferência de exergia que acompanha o fluxo de massa. Além disso, existe um trabalho de fluxo associado a uma transferência de exergia. O fluxo de exergia é responsável por ambos, e é dado por (MORAN; SHAPIRO, 2006):

$$e_f = h - h_0 - Temp_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} + g \cdot \mathcal{G} - g \cdot \mathcal{G}_0 \quad (3.3)$$

Onde h e s representam a entalpia e entropia específica, respectivamente, podendo ser de entrada ou saída dependendo de onde está se analisando; V refere-se à velocidade relativa do objeto de estudo; $Temp$ representa a temperatura, e $\mathcal{G}$ refere-se à posição relativa do objeto de estudo. O sub-índice $-0-$ representa o valor dessas magnitudes nas condições do estado de referência 0.

A expressão para o balanço de exergia é definida por meio da Segunda Lei da Termodinâmica, no caso, para volume de controle em regime permanente, é representada da seguinte forma:

$$\dot{I}_{oe} = \left(\sum \dot{m}_e e_e - \sum \dot{m}_s e_s \right) + \sum \left(1 - \frac{Temp_0}{Temp} \right) \dot{Q} - \dot{W} \quad (3.4)$$

Onde $\dot{I}_{oe}$ representa a taxa de geração de irreversibilidade do objeto de estudo; e_e e e_s as disponibilidades de entrada e saída, respectivamente; o termo $\left(1 - \frac{Temp_0}{Temp} \right) \dot{Q}$ refere-se à disponibilidade devido à transferência de calor, sendo, $Temp_0$ a temperatura do ambiente; e $\dot{W}$ é o trabalho realizado pelo volume de controle.

Esta equação indica que a taxa à qual a exergia é transferida para o volume de controle deve exceder a taxa a qual a exergia é transferida para fora. Sendo as irreversibilidades (taxa de exergia destruída) a diferença entre essas taxas.

3.3 MATRIZ RECURSO - PRODUTO

Um Sistema Térmico tem em sua estrutura física um conjunto de equipamentos que se inter-relacionam através de fluxos. Esses componentes possuem uma função ou propósito individual, e quando interligados contribuem para alcançar o propósito final do sistema (TORRES; VALERO, 2000).

Ao interagir com o ambiente um sistema consome recursos ou combustível (F), os quais passam por processos e se transformam em produtos (P). Como os processos reais possuem irreversibilidades/diminuição de qualidade (I), surgem fluxos de perda (L). A indicação desses fluxos é primordial para a definição do propósito do sistema, então se faz necessário explicar a aplicação desses conceitos.

Segundo Torres e Valero (2000) a definição Recurso – Produto de cada componente deve obedecer algumas condições:

- Todos os fluxos que entram ou saem de um componente, devem estar presentes na definição Recurso – Produto uma só vez, bem como combustível, produto ou perda.
- Cada fluxo ou combinação de fluxos que constituem o combustível, produto e perdas de cada componente deve ter um valor de sua função exergia maior ou igual a zero.
- O balanço de exergia de cada componente deve poder ser escrito na forma: $I = F - P - L > 0$.

A estrutura produtiva de um sistema térmico é a peça chave para a análise termoeconômica sustentada a partir da Teoria do Custo Exergético. Essa estrutura é a combinação da estrutura física de um sistema mais a definição do propósito produtivo de cada componente. Para representá-la utiliza-se um gráfico definido de igual forma a da estrutura física, mostrado na Figura 3.5, onde os fluxos de entrada são os recursos de cada componente e os fluxos de saída seus produtos (TORRES; VALERO, 2000).

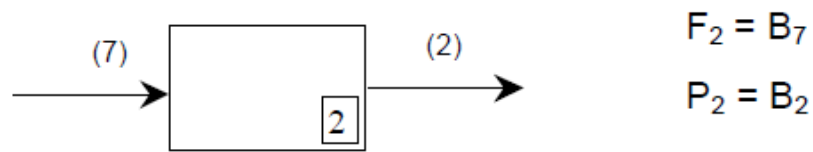


Figura 3. 7 - Estrutura produtiva de um compressor. (Fonte: Torres e Valero, 2000)

- Turbina: o propósito da turbina é produzir os fluxos de energia mecânica por expansão dos gases que entram nela, a exergia utilizada é a diferença de exergia entre os fluxos de gases de entrada e saída da turbina.

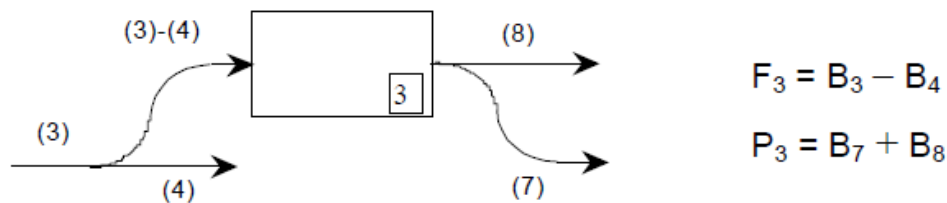


Figura 3. 8 - Estrutura produtiva de uma turbina. (Fonte: Torres e Valero, 2000)

- Caldeira de Recuperação (HRSG): tem como finalidade recuperar parte dos gases de saída da turbina em busca do aumento da exergia do vapor. A exergia dos gases de saída é considerada como uma perda ou irreversibilidade externa.

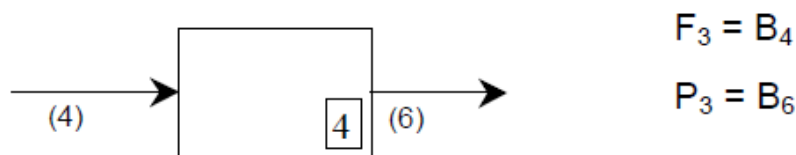


Figura 3. 9 - Estrutura produtiva de uma caldeira de recuperação (HRSG). (Fonte: Torres e Valero, 2000)

3.4 ASCENDANCY EXTENDIDO A UMA PLANTA INDUSTRIAL

O valor T_{ij} representa agora o fluxo energético que passa do equipamento i ao equipamento j . Ou seja, T_{ij} é a quantidade de exergia do produto de i que passa a formar parte do combustível de j . Na Tabela Recurso – Produto se representa como se distribui o

produto de cada equipamento ao longo de uma planta industrial, quanto será fonte de recursos em outros equipamentos e quanto se transforma em produto final. A Tabela, proporcionada pela análise termoeconômica, tem os valores de T_{ij} necessários para calcular o *Ascendancy*, como exemplificado na Tabela 3.5.

Tabela 3. 5 - Tabela Recurso – Produto hipotética para um sistema formado por quatro equipamentos

Exergia/tempo	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	Soma (linhas)
P ₀						
P ₁						
P ₂						
P ₃						
P ₄						
Soma (colunas)						Soma total

O equipamento zero é o ambiente, assim F_0 é o fluxo de entrada ao sistema desde o ambiente (combustível da planta). P_0 é o fluxo que sai do sistema para o ambiente (produto da planta). F_n , P_n [1,2,3,4] são respectivamente o combustível (fluxo de entrada) e o produto (fluxo de saída) de cada equipamento n .

Assim,

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij} = \sum_i P_i = \sum_j F_j \quad (3.5)$$

Agora relacionando os parâmetros com os anteriormente vistos no *Ascendancy*, tem-se que

$$\text{inc}_j = -k \log p(F_j) \quad (3.6)$$

ou seja $p(F_j)$ representa o peso energético de F_j em relação ao total de combustíveis.

$$\text{inc}_j^* = -k \log [p(F_j|P_i)] \quad (3.7)$$

Onde $p(F_j|P_i)$ é a fração do produto de i que passa a formar parte do combustível de j .

$$p(F_j | P_i) = \frac{p(P_i, F_j)}{p(P_i)} = \frac{T_{ij}}{P_i} \quad (3.8)$$

Se inc_j^* tende a zero, o equipamento j depende muito do equipamento i ; mas quando inc_j^* tende ao infinito, tem pouca dependência. Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para ecossistemas:

$$\text{inc}_j - \text{inc}_j^* = k \log \left(\frac{p(F_j | P_i)}{p(F_j)} \right) \quad (3.9)$$

$$p(P_i) \approx \frac{\sum_j T_{ij}}{T} \quad (3.10)$$

$$p(F_j) \approx \frac{\sum_i T_{ij}}{T} \quad (3.11)$$

$$p(P_i, F_j) = \frac{T_{ij}}{T} \quad (3.12)$$

Onde a equação (3.10) é a soma dos valores de cada coluna dividida pela soma total; a equação (3.11) é a soma de cada linha dividida pela soma total; e a equação (3.12) é cada elemento dividido pela soma total.

O “Ascendancy” para plantas industriais será então dado pela Equação (3.13):

$$A = \sum_i \sum_j T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{\sum_j T_{ij} \cdot \sum_i T_{ij}} \right) = \sum_i \sum_j T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{P_i \cdot F_j} \right) \quad (3.13)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem termodinâmica e termoeconômica realizados no software EES dos quadros ciclos Rankine estudados. Inicialmente verificou-se o grau interconexão das quatro configurações versus o *Ascendancy*, depois se analisou a configuração do ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo com diferentes rendimentos isoentrópicos versus o *Ascendancy*, nas duas situações foi mantido o produto final constante.

4.1 GRAU DE INTERCONEXÃO VERSUS *ASCENDANCY*

4.1.1 Ciclo Rankine com sobreaquecimento

A estrutura produtiva e a matriz Recurso-Produto estão representadas pela Figura 4.1 e pela Tabela 4.1, respectivamente.

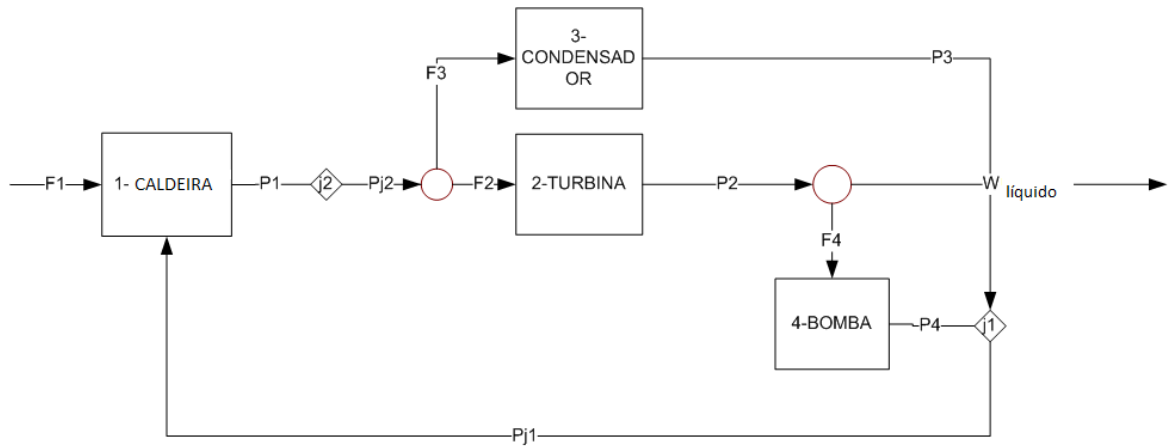


Figura 4. 1 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com sobreaquecimento.

Tabela 4. 1 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	SOMA
P0	0,00	251763,00	0,00	0,00	0,00	251763,00
P1	0,00	0,00	99919,07	8047,93	0,00	107967,00
P2	100000,00	0,00	0,00	0,00	639,70	100639,70
P3	0,00	0,00	128,92	10,38	0,00	139,30
P4	0,00	0,00	592,02	47,68	0,00	639,70
SOMA	100000,00	251763,00	100640,00	8106,00	639,70	461148,70

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.1 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 200935,98$.

4.1.2 Ciclo Rankine com reaquecimento

A estrutura produtiva e a matriz Recurso-Produto estão representadas pela Figura 4.2 e pela Tabela 4.2, respectivamente.

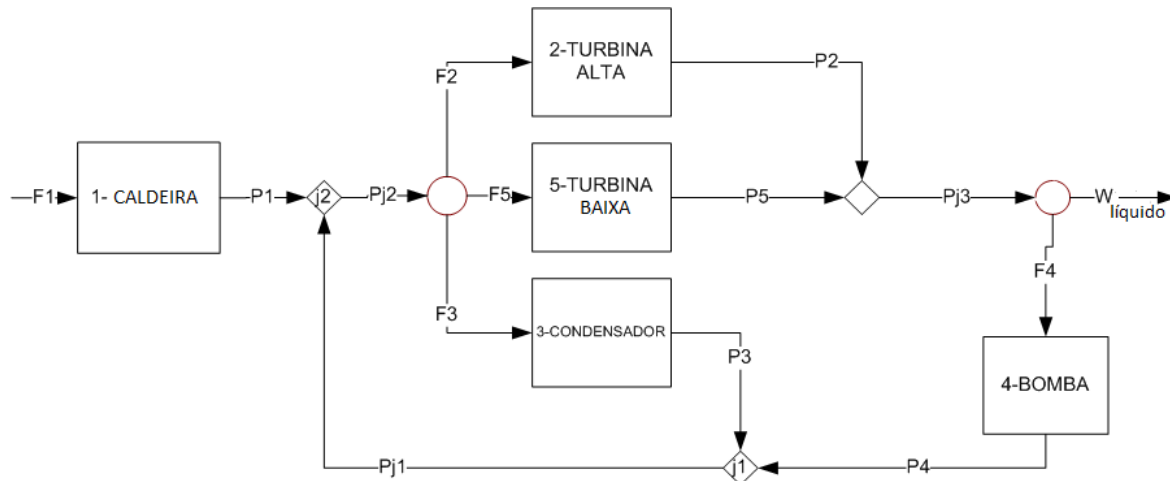


Figura 4. 2 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com reaquecimento.

Tabela 4. 2 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com reaquecimento

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	SOMA
P0	0,00	247954,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247954,00
P1	0,00	0,00	39536,71	7825,53	0,00	60271,10	107633,35
P2	34401,87	0,00	0,00	0,00	181,68	0,00	34583,55
P3	0,00	0,00	51,02	10,10	0,00	77,77	138,88
P4	0,00	0,00	234,27	46,37	0,00	357,13	637,77
P5	65598,13	0,00	0,00	0,00	346,42	0,00	65944,55
SOMA	100000,00	247954,00	39822,00	7882,00	528,10	60706,00	456892,10

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.2 se obtêm o valor do Ascendancy para esse ciclo de $A = 199247,48$.

4.1.3 Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

A estrutura produtiva e a matriz Recurso-Produto estão representadas pela Figura 4.3 e pela Tabela 4.3, respectivamente.

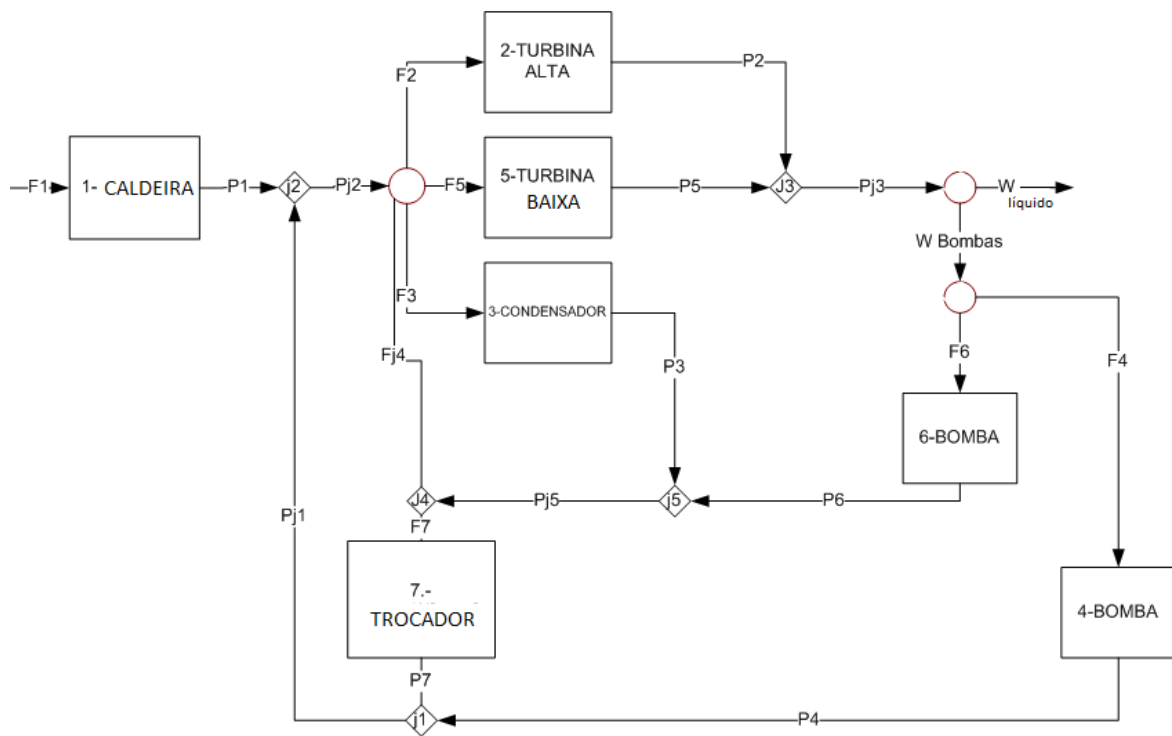


Figura 4. 3 - Estrutura produtiva para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.

Tabela 4. 3 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	SOMA
P0	0,00	235365,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	235365,00
P1	0,00	0,00	49445,24	6617,34	0,00	42782,43	0,00	12630,62	111475,64
P2	53618,21	0,00	0,00	0,00	385,41	0,00	26,53	0,00	54030,15
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124,30	124,30
P4	0,00	0,00	318,91	42,68	0,00	275,93	0,00	81,46	718,98
P5	46381,79	0,00	0,00	0,00	333,39	0,00	22,95	0,00	46738,13
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,50	49,50
P7	0,00	0,00	4258,90	569,98	0,00	3685,00	0,00	1101,62	9615,50
SOMA	100000,00	235365,00	54023,05	7230,00	718,80	46743,37	49,48	13987,50	458117,20

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.3 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 204611,17$.

4.1.4 Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.

A estrutura produtiva e a matriz Recurso-Produto estão representadas pela Figura 4.4 e pela Tabela 4.4, respectivamente.

Tabela 4. 4 - Matriz Recurso-Produto para o ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	SOMA
P0	0,00	232246,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	232246,00
P1	0,00	0,00	26074,03	14508,22	12734,23	34388,09	6138,40	0,00	0,00	6709,11	8088,39	1859,38	110499,85
P2	29729,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,13	190,39	0,00	0,00	0,00	29924,90
P3	16542,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,86	105,94	0,00	0,00	0,00	16650,95
P4	14519,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,96	221,07	0,00	0,00	0,00	14746,49
P5	39209,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,32	123,01	0,00	0,00	0,00	39335,33
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	102,80	0,00	0,00	102,80
P7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,30	0,00	0,00	17,30
P8	0,00	0,00	180,33	100,34	88,07	237,84	42,45	0,00	0,00	47,13	55,94	12,86	764,97
P9	0,00	0,00	1479,58	823,28	722,61	1951,37	348,33	0,00	0,00	386,65	458,98	105,51	6276,31
P10	0,00	0,00	2191,06	1219,16	1070,09	2889,71	515,82	0,00	0,00	572,57	679,69	156,25	9294,33
P11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1863,00	0,00	0,00	1863,00
SOMA	100000,00	232246,00	29925,00	16651,00	14615,00	39467,00	7045,00	17,27	640,40	9698,56	9283,00	2134,00	461722,23

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.4 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 209677,12$.

Por fim, para facilitar a comparação e a análise, a Tabela 4.5 mostra um resumo dos valores dos rendimentos e dos *Ascendancys* de cada ciclo estudado.

Tabela 4. 5 - Resumo dos valores do rendimento e do *Ascendancy* dos ciclos Rankine

CONFIGURAÇÕES DOS CICLOS RANKINES	RENDIMENTO	ASCENDANCY
CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO	0,3972	200935,98
CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO	0,4033	199247,48
CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO REGENERATIVO	0,4249	204611,17
CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO, REAQUECIMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO REGENERATIVO	0,4306	209677,12

4.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA VERSUS *ASCENDANCY*

Para a verificação do que ocorre com o *Ascendancy* ao se variar a eficiência do sistema escolheu-se o ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo. Nesse estudo utilizaram-se valores de 100%, 90%, 80% e 70% para a eficiência isoentrópica da turbina.

4.2.1 Rendimento isoentrópico 100%

Tabela 4. 6 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=100\%$

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	SOMA
P0	0,00	235365,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	235365,00
P1	0,00	0,00	49445,24	6617,34	0,00	42782,43	0,00	12630,62	111475,64
P2	53618,21	0,00	0,00	0,00	385,41	0,00	26,53	0,00	54030,15
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124,30	124,30
P4	0,00	0,00	318,91	42,68	0,00	275,93	0,00	81,46	718,98
P5	46381,79	0,00	0,00	0,00	333,39	0,00	22,95	0,00	46738,13
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,50	49,50
P7	0,00	0,00	4258,90	569,98	0,00	3685,00	0,00	1101,62	9615,50
SOMA	100000,00	235365,00	54023,05	7230,00	718,80	46743,37	49,48	13987,50	458117,20

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.6 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 204611,17$.

4.2.2 Rendimento isoentrópico 90%

Tabela 4. 7 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=90\%$

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	SOMA
P0	0,00	261020,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	261020,00
P1	0,00	0,00	49445,23	7863,01	0,00	42782,43	0,00	14041,95	114132,62
P2	53472,42	0,00	0,00	0,00	426,23	0,00	29,52	0,00	53928,16
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,60	138,60
P4	0,00	0,00	318,76	50,69	0,00	275,81	0,00	90,52	735,78
P5	46527,58	0,00	0,00	0,00	370,87	0,00	25,68	0,00	46924,14
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,20	55,20
P7	0,00	0,00	4259,05	677,29	0,00	3685,14	0,00	1224,81	9846,29
SOMA	100000,00	261020,00	54023,05	8591,00	797,10	46743,37	55,20	15551,08	486780,80

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.7 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 213559,50$.

4.2.3 Rendimento isoentrópico 80%

Tabela 4. 8 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=80\%$

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	SOMA
P0	0,00	293190,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	293190,00
P1	0,00	0,00	49445,10	9425,34	0,00	42782,31	0,00	15850,46	117503,23
P2	53333,07	0,00	0,00	0,00	477,54	0,00	33,25	0,00	53843,87
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	156,60	156,60
P4	0,00	0,00	319,04	60,82	0,00	276,04	0,00	102,27	758,17
P5	46666,93	0,00	0,00	0,00	417,86	0,00	29,10	0,00	47113,88
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,30	62,30
P7	0,00	0,00	4258,91	811,84	0,00	3685,01	0,00	1382,52	10138,28
SOMA	100000,00	293190,00	54023,05	10298,00	895,40	46743,37	62,35	17554,16	522766,32

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.8 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 224257,03$.

4.2.3 Rendimento isoentrópico 70%

Tabela 4. 9 - Matriz Recurso-Produto para $\eta=70\%$

Pi/Fi [kW]	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	SOMA
P0	0,00	334694,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	334694,00
P1	0,00	0,00	49445,12	11440,75	0,00	42782,33	0,00	18227,40	121895,60
P2	53200,98	0,00	0,00	0,00	543,71	0,00	38,07	0,00	53782,76
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	179,70	179,70
P4	0,00	0,00	319,09	73,83	0,00	276,09	0,00	117,63	786,63
P5	46799,02	0,00	0,00	0,00	478,29	0,00	33,48	0,00	47310,79
P6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	71,60	71,60
P7	0,00	0,00	4258,84	985,42	0,00	3684,95	0,00	1589,78	10519,00
SOMA	100000,00	334694,00	54023,05	12500,00	1022,00	46743,37	71,55	20186,11	569240,08

Aplicando a Equação (3.21) em conjunto com os dados da Tabela 4.9 se obtêm o valor do *Ascendancy* para esse ciclo de $A = 237352,01$.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.3.1 Grau de interconexão versus *Ascendancy*

A partir dos resultados obtidos pela modelagem termodinâmica observa-se que os valores dos rendimentos foram coerentes com o esperado, concretizando o abordado no capítulo 3 do referente trabalho. As variações nas configurações dos ciclos apresentaram o aumento do rendimento térmico, como mostra a Tabela 4.5. Saindo de um rendimento de 0,3972 no ciclo com sobreaquecimento foi possível chegar a um rendimento de 0,4306 no ciclo com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento regenerativo.

Tomando como base a configuração mais simples, com sobreaquecimento, é possível perceber uma diminuição no valor do *Ascendancy* se comparado com a configuração com reaquecimento, fato ocorrido devido o aumento do rendimento. Porém esses dois ciclos não apresentam nenhuma mudança em suas configurações, apenas um melhor aproveitamento da entrada do sistema (P_0) no ciclo com reaquecimento, devido o mesmo possuir uma maior interconexão entre os equipamentos do sistema.

Em relação à configuração com pré-aquecimento regenerativo observou-se o aumento do *Ascendancy* em virtude do surgimento de novos equipamentos no sistema e, consequentemente, do aumento das interconexões.

Após a incorporação de um pré-aquecimento no ciclo com rea aquecimento, quarta configuração estudada, obteve-se um aumento do *Ascendancy*, mostrando uma relação proporcional entre o grau de interconexões e o parâmetro *Ascendancy*.

4.3.1 Eficiência do sistema versus *Ascendancy*

A Tabela 4.10 mostra os resultados obtidos para o estudo da variação dos rendimentos isoentrópicos da turbina do ciclo Rankine com sobre aquecimento e pré-aquecimento regenerativo.

Tabela 4. 10 - Resultados obtidos para os diferentes rendimentos isoentrópicos da turbina

EFICIÊNCIA ISOENTRÓPICA (η)	ASCENDANCY	RENDIMENTO
100%	204611,17	0,4249
90%	213559,50	0,3831
80%	224257,03	0,3411
70%	237352,01	0,2988

Ao analisar um mesmo sistema com diferentes condições de operação verificou-se uma relação inversamente proporcional entre o rendimento do sistema e o valor do *Ascendancy*.

A capacidade de um sistema pode ser analisada a partir de dois componentes distintos e complementares, o *Ascendancy* e o *Overhead*. Enquanto o *Ascendancy* mede o grau de organização de um sistema, o *Overhead* mede todos os graus de desordem, ineficiência e redundâncias que o sistema mantém. Na ausência de perturbações externas, há uma propensão para que o *Ascendancy* do sistema cresça às custas do seu *Overhead*, ou seja, o próprio ecossistema tem uma tendência em seguir na direção de um desempenho cada vez mais eficiente. Porém, as perturbações sempre surgem, e um sistema com desempenho muito alto tem maior possibilidades de atingir o colapso. Assim, o *Overhead*, que é inimiga do desempenho em condições não perturbadas, torna-se um pré-requisito para a resiliência, criatividade e persistência do sistema (ULANOWICZ, 2000).

Após a revisão bibliográfica não foram encontrados na literatura pesquisada trabalhos que abordem essa interação do parâmetro *Ascendancy* aplicado a sistemas industriais por intermédio da Termoeconomia. Porém existem estudos com a temática um pouco semelhante, que buscam promover novas ideias, explorando aplicações que envolvam diversos tipos de áreas, ou seja, uma maior interdisciplinaridade.

Nielsen (2000) utilizou um modelo de ecossistema simples consistindo de uma cadeia alimentar aquática com reciclagem através de uma bactéria para investigar os fluxos de um ecossistema a partir da exergia e organizar o sistema como uma sequência hierárquica ordenada de sistemas, incorporados termodinamicamente uns aos outros. Conclui-se que a utilização desse princípio pode levar as relações termodinâmicas a serem usadas como restrições para o desenvolvimento de vários modelos de ecossistemas e usados em outros conceitos como análise ambiental, análises de efeitos indiretos, ascendência, manipulação e investigação em uma base comum.

Campbell (2000) analisou a quantificação da integridade ecológica e a saúde do ecossistema através da utilização de modelos de energia validados para conseguir um melhor entendimento dessas propriedades emergente de ecossistemas que operam na potência máxima. A propriedade emergia foi proposta, produção cumulativa de energia, como uma medida de integridade ecológica e descreve também que a integridade global dos ecossistemas pode ser avaliada comparando projetos de sistemas alternativos, pois essas propriedades podem ser aplicadas tanto aos ecossistemas naturais como aos ecossistemas que possuem atividades humanas.

Silow e Mokry (2010) analisaram a aplicação da exergia em ecologia para a modelagem ecológica e monitoramento do ecossistema natural. Em especial ele avaliou a saúde (estado) de um ecossistema aquático, o lago Baikal, e enfatizou a importância da exergia na ecologia para a análise de problemas teóricos e na resolução de tarefas aplicadas por apresentar vantagens como uma estreita relação com a teoria da informação, correlação alta com outras funções objetivo do ecossistema e facilidade de computação.

Bejan e Zane (2012) propuseram uma teoria unificada do fluxo, conhecida como lei unificadora de design na natureza, onde tudo que se move é considerado um sistema de fluxo. Ampliando sua lei para sistemas biológicos, sistemas inanimados e abstrações sociais. Bejan produz um design mecânico para tudo que esteja fluindo e faz comparações com a implementação da natureza, na qual produz padrões de design cuja configuração evolui para facilitar o fluxo (Lei Construtal).

Kharrazi *et. al* (2014) buscaram fornecer um melhor conhecimento de métodos, como exergia, pegada ecológica, tentativas de emergência e abordagens ecológicas baseadas em informações, para a quantificação da sustentabilidade levando em consideração três critérios, a integração de dimensões ecológicas e econômicas, a resiliência a longo prazo de um sistema e a consideração de propriedades extensivas e intensivas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Sendo uma medida de organização, o *Ascendancy* depende apenas indiretamente do tamanho e, em um sistema, qualquer componente é sempre refletido em seus fluxos. O crescimento se reflete nos fluxos, e o desenvolvimento se representa pelo aumento da informação. Esses dois atributos geram a organização que, por sua vez, se mede através do *Ascendancy*.

Este trabalho apresentou a extensão de um parâmetro aplicado em ecossistemas, o *Ascendancy*, a sistemas energéticos industriais na busca de traduzi-lo a termos termodinâmicos, por meio da Termoeconomia. Foram feitas revisões bibliográficas para adquirir e estender os conhecimentos necessários sobre o *Ascendancy* e a Termoeconomia. Inicialmente introduziu-se a Teoria do Custo Exergético, o processo de formação dos custos, as estruturas física e produtiva de um sistema térmico e apresentou-se a formulação da teoria *Ascendancy*. Posteriormente descreveu-se o ciclo Rankine e as quatro configurações estudadas, bem como as equações gerais, necessárias para a análise termodinâmica, dos balanços de massa, energia e exergia. Por meio da formulação da matriz Recurso-Produto o parâmetro *Ascendancy* foi estendido para ser aplicado em uma planta industrial. Por fim, aplicou-se essa adaptação nos ciclos Rankine estudados verificando a relação entre o grau de interconecção e a eficiência com o *Ascendancy*.

Após análise dos resultados, observou-se que não existe relação direta entre o rendimento global do sistema e o *Ascendancy* quando comparadas as distintas configurações entre si.

Comparando a configuração básica (apenas com sobreaquecimento), de rendimento global 39,72%, com a configuração com sobreaquecimento e pré-aquecimento

regenerativo ($\eta=70\%$) que possui rendimento global 29,88%, observa-se que, ao incorporar os equipamentos do sistema de pré-aquecimento, o *Ascendancy* aumenta.

Percebe-se que a influência do grau de interconexão é muito mais forte, pois ao aumentar a complexidade do sistema, o *Ascendancy* aumenta, independentemente do que ocorre com o rendimento global. Assim que, ao introduzir uma modificação no sistema, para que este se desenvolva, o *Ascendancy* aumentará ao aumentar a interconexão entre os equipamentos, e o sistema será mais evoluído do que o inicial.

Propõe-se como hipótese que, quando se comparam configurações diferentes de mesmo grau de interconexão entre os equipamentos e rendimentos parecidos, a configuração que possui o maior valor do *Ascendancy* será a que mais tem possibilidade de ser otimizada. Sendo uma configuração com maior grau de desenvolvimento, mas com rendimento similar ao dos outros, sugere que ainda não atingiu seu “clímax” (funcionamento ideal). O *Ascendancy*, neste sentido, pode ajudar a selecionar a configuração mais conveniente.

Como sugestão para trabalhos futuros para prosseguimento da pesquisa propõe-se:

- Aplicar a extensão do *Ascendancy* em outros tipos de ciclos de potência, ciclos de refrigeração, ciclos com maiores graus de interconexão;
- Analisar a capacidade de desenvolvimento dos ciclos estudados por meio do cálculo do *Overhead* e comparar com os valores de *Ascendancy*;
- Investigar como a interação aqui pesquisada se associa a Lei Construtal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L., G., 2007, *Análise exergoeconômica e otimização de diferentes processos de produção de hidrogênio a partir de gás metano*. Tese D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- ANGELINI, R., 1999, “Ecossistemas e modelagem ecológica”, *Perspectivas da Limnologia no Brasil*, v. 1, pp. 1-19.
- BALESTIERI, J., A., P., *et al.*, 1999, “Metodologias para análise de sistemas energéticos”. In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*. São Paulo, 22-26 agosto.
- BANERJEE, A., CHAKRABARTY, M., RAKSHIT, N., MUKHERJEE, J., RAY, S., 2017, “Indicators and assessment of ecosystem health of Bakreswar reservoir, India: An approach through network analysis”, *Ecological Indicators*, v. 80, pp. 163-173.
- BEJAN, A., ZANE, J., P., 2012, *Design in Nature: How the Constructal Law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization*, Edit. Doubleday, New York.
- BOLTZMANN, L., 1872, “Sobre a relação entre a 2ª lei da teoria mecânica do calor e cálculo de probabilidade concernente aos teoremas sobre o equilíbrio do calor, Über die Beziehung zwischen dem zmeiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. *Wiener Berichte*, v. 76, pp. 373.
- BOSWORTH, K., W., ULANOWICZ, R., E., 1991, “The Posible Role of Ascendancy in Neural Networks”, In: *American Mathematical society, Southeastern Sectional Meeting, 1991, Tampa. Anais*, pp. 122-123.
- BRINCK, K., JENSEN., H. J., 2017, “The evolution of ecosystem ascendancy in a complex systems based model”, *Journal of theoretical biology*, v. 428, pp. 18-25.

- BROWN, M., T., MCCLANAHAN, T., R., 1996, “Emergy Analysis Perspectives of Thailand and Mekong River Dam Proposals”, *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 91, pp. 105-130.
- CAMPBELL, D., E., 2000, “Using Energy Systems to Define, Measure, and Interpret Ecological Integrity and Ecosystem Health”. *Ecosystem Health*, v. 6, pp. 181-204.
- CAMPO, E., R., B., 1999, *Avaliação Termoeconômica do Sistema de Cogeração da Usina Vale do Rosário*. Tese D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- CARVALHO, M., 2011, *Análise termoeconômica e ambiental para a síntese de sistemas de poligeração no setor residencial-comercial*. Ph.D. tese, Universidade de Zaragoza, Zaragoza, Espanha.
- CERQUEIRA, S., A., A., G., *Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas*. Tese D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- CHRISTENSEN, V., 1994, “On the behavior of some proposed goal functions for ecosystem development”, *Ecological Modelling*, v. 75, pp. 37-49.
- DEWULF, J., 2016, “Exergy-Based Indicators: how to integrate exergy into policy, law and practice”. In: *Think Exergy not Energy – a Science Europe Workshop*.
- DINCER, I., MIDILLI, A., KUCUK, H., 2014, *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*.
- DINCER, I., ROSEN, M., A., 2013, *Exergy: energy, environment and sustainable development*. 2^a ed, Elsevier Ltd.
- FABIANO, M., *et al.*, 2004, “Temporal and spatial change of exergy and ascendancy in diferente benthic marine ecosystems”, *Energy*, v. 29, n. 11, pp. 1697-1712.
- FIOMARI, M., C., *et al.*, 2006, “Análise termodinâmica e termoeconômica de uma usina sucroalcooleira que produz excedente de energia para comercialização”. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.
- FRANGOPOULOS, C. A., (Ed.), (2009), *Exergy, Energy System Analysis and Optimization – Volume I: Exergy and Thermodynamic Analysis*, EOLSS Publications.
- GUARINELLO, F., CERQUEIRA, S., A., A., G., NEBRA, S., A., 2000, “Thermoeconomic evaluation of a gas turbine cogeneration system”. *Energy conversion and management*, v. 41, n. 11, pp. 1191-1200.

- HUANG, J., ULANOWICZ, R., E., 2014, “Ecological network analysis for economic systems: growth and development and implications for sustainable development”, *PloS one*, v. 9, n. 6, pp. e100923.
- HUMPHREYS, P., 1997, “How Porperties Emerge”. *Philos. Sci.*, New York, v. 64, n. 1, pp. 1-17.
- JØRGENSEN, S., E., 1999, “State-of-the-Art of Ecological Modelling with Emphasis on Development o Structural Dynamic Models”, *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 120, n. 1, pp. 75-96.
- JØRGENSEN, S., E., ULANOWICZ, R. E., 2009, “Network calculations and ascendancy based on eco-exergy”, *Ecological Modelling*, v. 220, n. 16, pp. 1893-1896.
- KHARRAZI, A., KRAINES, S., HOANG, L., *et. al*, 2014, “Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination emergy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches”. *Ecological Indicators*, v. 37, pp. 81-89.
- KOTAS, T., J., 1985, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Edit. Butterworths, London.
- LOURENÇO, A., B., 2016, “Uma abordagem termoeconômica sitemática para modelagem de ciclos termodinâmicos”, Tese D.Sc., Universidade Federal do ABC.
- LOZANO, M., A., VALERO, A., 1993, “Teoria do Custo Exergético”, *Energy*, n. 9, v. 18, pp. 939-960.
- LOZANO, M., A., VALERO, A., 1989, *Teoria do Custo Exergético II. Aplicação a testes de rendimento*. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Zaragoza.
- LOZANO, M., A., VALERO, A., GUALLAR, J., 1989, *Teoria do Custo Exergético I. Conceitos Básicos*. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Zaragoza.
- MARCUELLO, F., J., U., 2000, *Análise termoeconômica e simulação de uma planta combinada de produção de água e energia*. Tese D.Sc., Universidade de Zaragoza, Espanha.
- MISRA, R., D., SAHOO, P., K., GUPTA, A., 2002, “Application of the exergetic cost theory to the LiBr/H₂O vapour absorption system”, *Energy*, v. 27, n. 11, pp. 1009-1025.

- MORAN, M., J., SHAPIRO, H., N., 2006, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7th edition, John Wiley & Sons.
- MÜLLER, F., 1997, "State-of-the-Art in Ecosystem Theory", *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 100, n. 1, pp. 135-161.
- NIELSEN, S., N., 2000, "Thermodynamics of an ecosystem interpreted as a hierarchy of embedded systems". *Ecological Modelling*, v. 135, pp. 279-289.
- NIELSEN, S., N., ULANOWICZ, R., E., 2000, "On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems", *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 132, n. 1, pp. 23-31.
- ODUM, E., P., 1969, "The Strategy of Ecosystem Development", *Science*, v. 164, n. 3877, pp. 596-604.
- PALACIO, J., C., E., 2010, *Análise Termoeconômica Integrada das Plantas de Cogeração e Etanol em uma Destilaria Autônoma*. Tese D.Sc, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- PATTEN, B., C., 1995, "Network integration of ecological extremal principles: exergy, emergy, power, ascendancy, and indirect effects", *Ecological Modelling*, v. 79, pp. 75-84.
- RÜCKER, C., P., R., 2005, *Análise exergoeconômica de uma planta de cogeração baseada em microturbina a gás natural e refrigeração por absorção pela teoria do custo exergético*. Dissertação M. Sc., UFSC, Florianópolis, Brasil.
- SANTOS, J., J., C., S., 2009, *Aplicação da Neguentropia na Modelagem Termoeconômica de Sistemas*. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- SILOW, E., A., MOKRY, A., V., 2010, "Exergy as a tool for ecosystem health assessment". *Entropy*, v. 12, n. 4, pp. 902-925.
- SILVA, M., M., 2004, *Repotenciamento em sistemas de geração de potência na indústria siderúrgica utilizando análise termoeconômica*. Tese D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- SILVA, D., C., SILVA, R., J., 2010, "Análise termoeconômica da Usina Termoelétrica de Drax operando com carvão mineral pulverizado". In: *Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 18-21 agosto.
- SKYRMS, B., 1980, *A Pragmatic Investigation of the Necessity of Laws*. Yale University Press, New Haven, pp. 205.

- SOTOMONTE, C., A., R., 2009, *Análise Exergética, Termoeconômica e Ambiental de uma Usina Termoelétrica Supercrítica a Carvão Mineral*. Dissertação M. Sc., UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil.
- TAKAKI, A., T., 2006, *Análise do Aproveitamento do Gás Natural em Plantas de Cogeração e Trigeração de Energia em Indústrias Frigoríficas*. Dissertação M. Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- TORRES, C., VALERO, A., 2000, *Curso de Doutorado: Termoeconomia*. Zaragoza, Espanha: Universidade de Zaragoza.
- TORRES, C., VALERO, A., RANGEL, V., *et al.*, 2008, “On the cost formation processo f the residues”, *Energy*, v. 33, n. 2, pp. 144-152.
- TRIBUS, M., MCIRVINE, E., C., 1971, “Energy and information”. *Scientific American*, v. 225, n. 3, pp. 179-190.
- ULANOWICZ, R., E., 1980, “An hypothesis on the Development of Natural Communmes”. *J.theor. Biol*, n. 85, pp. 223-245.
- ULANOWICZ, R., E., 1999a, *Ecology, the Ascendent Perspective*. Columbia University Press, New York.
- ULANOWICZ, R., E., 2000, Toward the measurement of ecological integrity. *Ecological Integrity: integrating environment, conservation and helth*, pp. 99-113.
- ULANOWICZ, R., E., JØRGENSEN, S., E., FATH, B., D., 2006, “Exergy, information and aggradation: An ecosystems reconciliation”, *Ecological Modelling*, v. 198, n. 3-4, pp. 520-524.
- ULANOWICZ, R., E., 1986, *Growth and Development: Ecosystem Phenomenology*, Springer Verlag, New York.
- ULANOWICZ, R., E., 1999b, “Life alter Newton: an Ecological Metaphysic”, *Bio Systems*, n. 50, pp. 127-142.
- ULANOWICZ, R., E., 2004, “On the Nature of Ecodynamics”, *Ecological Complexity*, n. 4, v. 1, pp. 341-354.
- VALERO, A., (2009), *The thermodynamic process of cost formation. Exergy, Energy System Analysis and Optimization – Volume II: Thermoeconomic Analysis Modeling, Simulation and Optimization in Energy Systems*, v. 2, pp. 35.
- VALERO, A., LOZANO, M., A., SERRA, L., M., *et al.*, 1994, “Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem”, *Energy*, v. 19, n. 3, pp. 365-381.

- VALERO, A., LOZANO, M., A., MUÑOZ, M., 1986, “A general theory of exergy saving. I. On the exergetic cost”, *Computer-aided engineering and energy systems: second law analysis and modelling*, v. 3, pp. 1-8.
- VALERO, A.; TORRES, C., 2006, “Thermoeconomic Analysis”. In: *Frangopoulos, C. (Ed.). Exergy, energy system analysis and optimization*, vol. II. Oxford, United Kingdom: Eolss Publishers Co. Ltd.
- VALERO, A., SERRA, L., UCHE, J., 2006, “Fundamentals of exergy cost accounting and thermoeconomics. Part I: Theory”, *Journal of Energy Resources Technology*, v. 128, n. 1, pp. 1-8.
- VALERO, A., USÓN, S., TORRES, C., *et al.*, 2017, “Theory of Exergy Cost and Thermoeological Cost”. In: *Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources*. Springer International Publishing, pp. 167-202.
- VAN WYLEN, G., J., SONNTAG, R., E., BORGNAKKE, C., 2003, *Fundamentos da Termodinâmica*, 6ª ed., São Paulo, BR, Ed-Edgard Blücher.

APÊNDICE I

O software Engineering Equation Solver (EES) foi utilizado para a modelagem termodinâmica dos ciclos Rankine descritos na seção 3.1.

Modelagem termodinâmica dos ciclos Rankine

{CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO}

"1. DADOS DE ENTRADA"

p[4]=8000 [kPa]	"Pressão de entrada da caldeira"
t[1]=480+273,15 [°C]	"Temperatura do vapor sobreaquecido"
p[2]=8 [kPa]	"Pressão do condensador"
W_dot_liq=100000 [kW]	"Potência líquida"

"Bomba e turbina isoentrópicos"

"2. ESTADOS TERMODINÂMICOS"

"2.1 ESTADO 0 - REFERÊNCIA"

```

t[0]=25+273,15
p[0]=101,325
v[0]=Volume(Steam;T=t[0];P=p[0])
u[0]=IntEnergy(Steam;T=t[0];P=p[0])
h[0]=Enthalpy(Steam;T=t[0];P=p[0])
s[0]=Entropy(Steam;T=t[0];P=p[0])

```

"2.2 ESTADO 1 - ENTRADA DA TURBINA"

```

p[1]=p[4]
v[1]=Volume(Steam;T=t[1];P=p[1])
u[1]=IntEnergy(Steam;T=t[1];P=p[1])
h[1]=Enthalpy(Steam;T=t[1];P=p[1])
s[1]=Entropy(Steam;T=t[1];P=p[1])
b[1]=(h[1]-h[0])-t[0]*(s[1]-s[0])

```

$$\text{Ex}[1]=\dot{m} \cdot b[1]$$

"2.3 ESTADO 2 - ENTRADA DO CONDENSADOR"

$$\begin{aligned} t[2] &= \text{Temperature}(\text{Steam}; S=s[2]; P=p[2]) \\ v[2] &= \text{Volume}(\text{Steam}; S=s[2]; P=p[2]) \\ u[2] &= \text{IntEnergy}(\text{Steam}; S=s[2]; P=p[2]) \\ h[2] &= \text{Enthalpy}(\text{Steam}; S=s[2]; P=p[2]) \\ s[2] &= s[1] \\ b[2] &= (h[2]-h[0]) - t[0] \cdot (s[2]-s[0]) \end{aligned}$$

$$\text{Ex}[2]=\dot{m} \cdot b[2]$$

"2.4 ESTADO 3 - ENTRADA DA BOMBA"

$$\begin{aligned} p[3] &= p[2] \\ x[3] &= 0 \\ t[3] &= \text{Temperature}(\text{Steam}; X=x[3]; P=p[3]) \\ v[3] &= \text{Volume}(\text{Steam}; X=x[3]; P=p[3]) \\ u[3] &= \text{IntEnergy}(\text{Steam}; X=x[3]; P=p[3]) \\ h[3] &= \text{Enthalpy}(\text{Steam}; X=x[3]; P=p[3]) \\ s[3] &= \text{Entropy}(\text{Steam}; X=x[3]; P=p[3]) \\ b[3] &= (h[3]-h[0]) - t[0] \cdot (s[3]-s[0]) \end{aligned}$$

$$\text{Ex}[3]=\dot{m} \cdot b[3]$$

"2.5 ESTADO 4 - ENTRADA DA CALDEIRA"

$$\begin{aligned} t[4] &= \text{Temperature}(\text{Steam}; S=s[4]; P=p[4]) \\ v[4] &= \text{Volume}(\text{Steam}; S=s[4]; P=p[4]) \\ u[4] &= \text{IntEnergy}(\text{Steam}; S=s[4]; P=p[4]) \\ h[4] &= \text{Enthalpy}(\text{Steam}; S=s[4]; P=p[4]) \\ s[4] &= s[3] \\ b[4] &= (h[4]-h[0]) - t[0] \cdot (s[4]-s[0]) \end{aligned}$$

$$\text{Ex}[4]=\dot{m} \cdot b[4]$$

"3. ANÁLISE DOS VOLUMES DE CONTROLE"

"3.1 TURBINA"

$$\dot{W}_{\text{tur}} = \dot{m} \cdot (h[1] - h[2])$$

"3.2 CONDENSADOR"

$$\dot{Q}_{\text{con}} = \dot{m} \cdot (h[3] - h[2])$$

"3.3 BOMBA"

$$W_{\text{dot_bom}} = m_{\text{dot}} * (h[3] - h[4])$$

"3.4 CALDEIRA"

$$Q_{\text{dot_cal}} = m_{\text{dot}} * (h[1] - h[4])$$

"3.5 RANKINE"

$$\text{Eta} = W_{\text{dot_liq}} / Q_{\text{dot_cal}}$$

$$W_{\text{dot_liq}} = W_{\text{dot_tur}} + W_{\text{dot_bom}}$$

{CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO}

"1. DADOS DE ENTRADA"

$$p[6] = 8000 \text{ [kPa]}$$

$$t[1] = 480 + 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p[3] = 700 \text{ [kPa]}$$

$$t[3] = 440 + 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p[4] = 8 \text{ [kPa]}$$

$$W_{\text{dot_liq}} = 100000 \text{ [kW]}$$

"Pressão de entrada da caldeira"

"Temperatura do vapor sobreaquecido"

"Pressão de entrada na turbina de baixa"

"Temperatura do vapor reaquecido"

"Pressão do condensador"

"Potência líquida"

"Bomba e Turbinas isoentrópicos"

"2. ESTADOS TERMODINÂMICOS"

"2.1 ESTADO 0 - REFERÊNCIA"

$$t[0] = 25 + 273,15$$

$$p[0] = 101,325$$

$$v[0] = \text{Volume}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$u[0] = \text{IntEnergy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$h[0] = \text{Enthalpy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$s[0] = \text{Entropy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

"2.2 ESTADO 1 - ENTRADA DA TURBINA DE ALTA"

$$p[1] = p[6]$$

$$v[1] = \text{Volume}(\text{Steam}; T=t[1]; P=p[1])$$

$$u[1] = \text{IntEnergy}(\text{Steam}; T=t[1]; P=p[1])$$

$$h[1] = \text{Enthalpy}(\text{Steam}; T=t[1]; P=p[1])$$

$$s[1] = \text{Entropy}(\text{Steam}; T=t[1]; P=p[1])$$

$$b[1] = (h[1] - h[0]) - t[0] * (s[1] - s[0])$$

$$\text{Ex}[1] = m_{\text{dot}} * b[1]$$

"2.3 ESTADO 2 - ENTRADA DA SEÇÃO DE REAQUECIMENTO"

$$p[2] = p[3]$$


```

t[2]=Temperature(Steam;S=s[2];P=p[2])
v[2]=Volume(Steam;S=s[2];P=p[2])
u[2]=IntEnergy(Steam;S=s[2];P=p[2])
h[2]=Enthalpy(Steam;S=s[2];P=p[2])
s[2]=s[1]
b[2]=(h[2]-h[0])-t[0]*(s[2]-s[0])

```

```
Ex[2]=m_dot*b[2]
```

"2.4 ESTADO 3 - ENTRADA DA TURBINA DE BAIXA"

```

v[3]=Volume(Steam;T=t[3];P=p[3])
u[3]=IntEnergy(Steam;T=t[3];P=p[3])
h[3]=Enthalpy(Steam;T=t[3];P=p[3])
s[3]=Entropy(Steam;T=t[3];P=p[3])
b[3]=(h[3]-h[0])-t[0]*(s[3]-s[0])

```

```
Ex[3]=m_dot*b[3]
```

"2.5 ESTADO 4 - ENTRADA DO CONDENSADOR"

```

t[4]= Temperature(Steam;S=s[4];P=p[4])
v[4]=Volume(Steam;S=s[4];P=p[4])
u[4]=IntEnergy(Steam;S=s[4];P=p[4])
h[4]=Enthalpy(Steam;S=s[4];P=p[4])
s[4]=s[3]
b[4]=(h[4]-h[0])-t[0]*(s[4]-s[0])

```

```
Ex[4]=m_dot*b[4]
```

"2.6 ESTADO 5 - ENTRADA DA BOMBA"

```

p[5]=p[4]
x[5]=0
t[5]=Temperature(Steam;X=x[5];P=p[5])
v[5]=Volume(Steam;X=x[5];P=p[5])
u[5]=IntEnergy(Steam;X=x[5];P=p[5])
h[5]=Enthalpy(Steam;X=x[5];P=p[5])
s[5]=Entropy(Steam;X=x[5];P=p[5])
b[5]=(h[5]-h[0])-t[0]*(s[5]-s[0])

```

```
Ex[5]=m_dot*b[5]
```

"2.7 ESTADO 6 - ENTRADA DA CALDEIRA"

```

t[6]=Temperature(Steam;S=s[6];P=p[6])
v[6]=Volume(Steam;S=s[6];P=p[6])
u[6]=IntEnergy(Steam;S=s[6];P=p[6])
h[6]=Enthalpy(Steam;S=s[6];P=p[6])

```

$$s[6]=s[5]$$

$$b[6]=(h[6]-h[0])-t[0]*(s[6]-s[0])$$

$$Ex[6]=m_dot*b[6]$$

"3. ANÁLISE DOS VOLUMES DE CONTROLE"

"3.1 TURBINA"

$$W_dot_tur=W_dot_tura+W_dot_turb$$

$$W_dot_tura=m_dot*(h[1]-h[2])$$

$$W_dot_turb=m_dot*(h[3]-h[4])$$

"3.2 CONDENSADOR"

$$Q_dot_con=m_dot*(h[5]-h[4])$$

"3.3 BOMBA"

$$W_dot_bom=m_dot*(h[5]-h[6])$$

"3.4 CALDEIRA"

$$Q_dot_cal=m_dot*((h[1]-h[6])+(h[3]-h[2]))$$

"3.5 RANKINE"

$$Eta=W_dot_liq/Q_dot_cal$$

$$W_dot_liq=W_dot_tur+W_dot_bom$$

{CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO REGENERATIVO}

"1. DADOS DE ENTRADA"

$p[7]=8000 \text{ [kPa]}$	"Pressão na caldeira"
$t[1]=480+273,15 \text{ [°C]}$	"Temperatura do vapor sobreaquecido"
$p[2]=700 \text{ [kPa]}$	"Pressão de entrada da turbina de baixa"
$p[3]=8 \text{ [kPa]}$	"Pressão do condensador"
$W_dot_liq=100000 \text{ [kW]}$	"Potência líquida"

"Bombas e Turbinas isoentrópicas"

"2. ESTADOS TERMODINÂMICOS"

"2.1 ESTADO 0 - REFERÊNCIA"

$$t[0]=25+273,15$$

$$p[0]=101,325$$

```

v[0]=volume(Steam;T=t[0];P=p[0])
u[0]=intenergy(Steam;T=t[0];P=p[0])
h[0]=enthalpy(Steam;T=t[0];P=p[0])
s[0]=entropy(Steam;T=t[0];P=p[0])

```

"2.2 ESTADO 1 - ENTRADA DA TURBINA DE ALTA"

```

p[1]=p[7]
v[1]=volume(Steam;T=t[1];P=p[1])
u[1]=intenergy(Steam;T=t[1];P=p[1])
h[1]=enthalpy(Steam;T=t[1];P=p[1])
s[1]=entropy(Steam;T=t[1];P=p[1])
b[1]=(h[1]-h[0])-t[0]*(s[1]-s[0])

```

```
Ex[1]=m_dot*b[1]
```

"2.2 ESTADO 2 - ENTRADA DO TROCADOR (y) E DA TURBINA DE BAIXA"

```

t[2]=temperature(Steam;s=s[2];P=p[2])
v[2]=volume(Steam;s=s[2];P=p[2])
u[2]=intenergy(Steam;s=s[2];P=p[2])
h[2]=enthalpy(Steam;s=s[2];P=p[2])
s[2]=s[1]
b[2]=(h[2]-h[0])-t[0]*(s[2]-s[0])

```

```
Ex[2]=y*b[2]
```

"2.2 ESTADO 3 - ENTRADA DO CONDENSADOR"

```

T[3]=temperature(Steam;s=s[3];P=p[3])
v[3]=volume(Steam;s=s[3];P=p[3])
u[3]=intenergy(Steam;s=s[3];P=p[3])
h[3]=enthalpy(Steam;s=s[3];P=p[3])
s[3]=s[1]
b[3]=(h[3]-h[0])-t[0]*(s[3]-s[0])

```

```
Ex[3]=(m_dot-y)*b[3]
```

"2.2 ESTADO 4 - ENTRADA DA BOMBA 1"

```

p[4]=p[3]
x[4]=0
t[4]=temperature(Steam;x=x[4];P=p[4])
v[4]=volume(Steam;x=x[4];P=p[4])
u[4]=intenergy(Steam;x=x[4];P=p[4])
h[4]=enthalpy(Steam;x=x[4];P=p[4])
s[4]=entropy(Steam;x=x[4];P=p[4])
b[4]=(h[4]-h[0])-t[0]*(s[4]-s[0])

```

$$Ex[4]=(m_dot-y)*b[4]$$

"2.2 ESTADO 5 - ENTRADA DO TROCADOR (1-y)"

$$\begin{aligned} p[5] &= p[2] \\ t[5] &= \text{temperature}(\text{Steam}; s=s[5]; P=p[5]) \\ v[5] &= \text{volume}(\text{Steam}; s=s[5]; P=p[5]) \\ u[5] &= \text{intenergy}(\text{Steam}; s=s[5]; P=p[5]) \\ h[5] &= \text{enthalpy}(\text{Steam}; s=s[5]; P=p[5]) \\ s[5] &= s[4] \\ b[5] &= (h[5]-h[0])-t[0]*(s[5]-s[0]) \end{aligned}$$

$$Ex[5]=(m_dot-y)*b[5]$$

"2.2 ESTADO 6 - ENTRADA DA BOMBA 2"

$$\begin{aligned} p[6] &= p[2] \\ x[6] &= 0 \\ t[6] &= \text{temperature}(\text{Steam}; x=x[6]; P=p[6]) \\ v[6] &= \text{volume}(\text{Steam}; x=x[6]; P=p[6]) \\ u[6] &= \text{intenergy}(\text{Steam}; x=x[6]; P=p[6]) \\ h[6] &= \text{enthalpy}(\text{Steam}; x=x[6]; P=p[6]) \\ s[6] &= \text{entropy}(\text{Steam}; x=x[6]; P=p[6]) \\ b[6] &= (h[6]-h[0])-t[0]*(s[6]-s[0]) \end{aligned}$$

$$Ex[6]=m_dot*b[6]$$

"2.2 ESTADO 7 - ENTRADA DA CALDEIRA"

$$\begin{aligned} t[7] &= \text{temperature}(\text{Steam}; s=s[7]; P=p[7]) \\ v[7] &= \text{volume}(\text{Steam}; s=s[7]; P=p[7]) \\ u[7] &= \text{intenergy}(\text{Steam}; s=s[7]; P=p[7]) \\ h[7] &= \text{enthalpy}(\text{Steam}; s=s[7]; P=p[7]) \\ s[7] &= s[6] \\ b[7] &= (h[7]-h[0])-t[0]*(s[7]-s[0]) \end{aligned}$$

$$Ex[7]=m_dot*b[7]$$

"3. ANÁLISES DOS VOLUMES DE CONTROLE"

"3.1 TURBINA"

$$\begin{aligned} W_dot_tur &= W_dot_tura + W_dot_turb \\ W_dot_tura &= m_dot*(h[1]-h[2]) \\ W_dot_turb &= (m_dot-y)*(h[2]-h[3]) \end{aligned}$$

"3.2 CONDENSADOR"

$$Q_dot_con=(m_dot-y)*(h[4]-h[3])$$

"3.3 BOMBA"

$$W_{\text{dot_bom}} = W_{\text{dot_bom1}} + W_{\text{dot_bom2}}$$

$$W_{\text{dot_bom1}} = (m_{\text{dot}} - y) \cdot (h[4] - h[5])$$

$$W_{\text{dot_bom2}} = m_{\text{dot}} \cdot (h[6] - h[7])$$

"3.4 TROCADOR"

$$y \cdot h[2] + (m_{\text{dot}} - y) \cdot h[5] = m_{\text{dot}} \cdot h[6]$$

"3.5 CALDEIRA"

$$Q_{\text{dot_cal}} = m_{\text{dot}} \cdot (h[1] - h[7])$$

"3.6 RANKINE"

$$\text{Eta} = W_{\text{dot_liq}} / Q_{\text{dot_cal}}$$

$$W_{\text{dot_liq}} = W_{\text{dot_tur}} + W_{\text{dot_bom}}$$

{CICLO RANKINE COM SOBREAQUECIMENTO, REAQUECIMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO}

"1. DADOS DE ENTRADA"

$p[11] = 8000 \text{ [kPa]}$	"Pressão na caldeira"
$t[1] = 480 + 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$	"Temperatura do vapor sobreaquecido"
$p[2] = 2000 \text{ [kPa]}$	"Extração de vapor na turbina de baixa (1)"
$t[11] = 205 + 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$	"Temperatura de saída do trocador aberto"
$p[3] = 700 \text{ [kPa]}$	"Pressão de saída na turbina de baixa (1)"
$t[4] = 440 + 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$	"Temperatura do vapor reaquecido"
$p[5] = 300 \text{ [kPa]}$	"Extração de vapor na turbina de baixa (2)"
$p[6] = 8 \text{ [kPa]}$	"Pressão do condensador"
$W_{\text{dot_liq}} = 100000 \text{ [kW]}$	"Potência líquida"

"Bombas e turbinas isoentrópicos"

"2. ESTADOS TERMODINÂMICOS"

"2.1 ESTADO 0 - REFERÊNCIA"

$$t[0] = 25 + 273,15$$

$$p[0] = 101,325$$

$$v[0] = \text{volume}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$u[0] = \text{intenergy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$h[0] = \text{enthalpy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

$$s[0] = \text{entropy}(\text{Steam}; T=t[0]; P=p[0])$$

"2.2 ESTADO 1 - ENTRADA DA TURBINA DE ALTA (1)"

```
p[1]=p[11]
v[1]=volume(Steam;T=t[1];P=p[1])
u[1]=intenergy(Steam;T=t[1];P=p[1])
h[1]=enthalpy(Steam;T=t[1];P=p[1])
s[1]=entropy(Steam;T=t[1];P=p[1])
b[1]=(h[1]-h[0])-t[0]*(s[1]-s[0])
```

```
Ex[1]=m_dot*b[1]
```

"2.3 ESTADO 2 - ENTRADA DA TROCADOR DE CALOR (2) E TURBINA DE BAIXA (1)"

```
t[2]=temperature(Steam;s=s[2];P=p[2])
v[2]=volume(Steam;s=s[2];P=p[2])
u[2]=intenergy(Steam;s=s[2];P=p[2])
h[2]=enthalpy(Steam;s=s[2];P=p[2])
s[2]=s[1]
b[2]=(h[2]-h[0])-t[0]*(s[2]-s[0])
```

```
Ex[2]=y*b[2]
```

"2.4 ESTADO 3 - ENTRADA DA SEÇÃO DE REAQUECIMENTO"

```
t[3]=temperature(Steam;P=p[3];s=s[3])
v[3]=volume(Steam;P=p[3];s=s[3])
u[3]=intenergy(Steam;P=p[3];s=s[3])
h[3]=enthalpy(Steam;P=p[3];s=s[3])
s[3]=s[2]
b[3]=(h[3]-h[0])-t[0]*(s[3]-s[0])
```

```
Ex[3]=(m_dot-y)*b[3]
```

"2.5 ESTADO 4 - ENTRADA DA TURBINA DE ALTA (2)"

```
p[4]=p[3]
v[4]=volume(Steam;T=t[4];P=p[4])
u[4]=intenergy(Steam;T=t[4];P=p[4])
h[4]=enthalpy(Steam;T=t[4];P=p[4])
s[4]=entropy(Steam;T=t[4];P=p[4])
b[4]=(h[4]-h[0])-t[0]*(s[4]-s[0])
```

```
Ex[4]=(m_dot-y)*b[4]
```

"2.6 ESTADO 5 - ENTRADA DA TROCADOR DE CALOR (1) E TURBINA DE BAIXA (2)"

```
t[5]=temperature(Steam;s=s[5];P=p[5])
```

```

v[5]=volume(Steam;s=s[5];P=p[5])
u[5]=intenergy(Steam;s=s[5];P=p[5])
h[5]=enthalpy(Steam;s=s[5];P=p[5])
s[5]=s[4]
b[5]=(h[5]-h[0])-t[0]*(s[5]-s[0])

```

```
Ex[5]=z*b[5]
```

"2.7 ESTADO 6 - ENTRADA DO CONDENSADOR"

```

t[6]=temperature(Steam;s=s[6];P=p[6])
v[6]=volume(Steam;s=s[6];P=p[6])
u[6]=intenergy(Steam;s=s[6];P=p[6])
h[6]=enthalpy(Steam;s=s[6];P=p[6])
s[6]=s[5]
b[6]=(h[6]-h[0])-t[0]*(s[6]-s[0])

```

```
Ex[6]=(m_dot-y-z)*b[6]
```

"2.8 ESTADO 7 - ENTRADA DA BOMBA (1)"

```

P[7]=P[6]
x[7]=0
t[7]=temperature(Steam;x=x[7];P=p[7])
v[7]=volume(Steam;x=x[7];P=p[7])
u[7]=intenergy(Steam;x=x[7];P=p[7])
h[7]=enthalpy(Steam;x=x[7];P=p[7])
s[7]=entropy(Steam;x=x[7];P=p[7])
b[7]=(h[7]-h[0])-t[0]*(s[7]-s[0])

```

```
Ex[7]=(m_dot-y-z)*b[7]
```

"2.9 ESTADO 8 - ENTRADA DO TROCADOR DE CALOR (1) [m-y-z]"

```

p[8]=p[5]
t[8]=temperature(Steam;s=s[8];P=p[8])
v[8]=volume(Steam;s=s[8];P=p[8])
u[8]=intenergy(Steam;s=s[8];P=p[8])
h[8]=enthalpy(Steam;s=s[8];P=p[8])
s[8]=s[7]
b[8]=(h[8]-h[0])-t[0]*(s[8]-s[0])

```

```
Ex[8]=(m_dot-y-z)*b[8]
```

"2.10 ESTADO 9 - ENTRADA DA BOMBA (2)"

```

p[9]=p[5]
x[9]=0
t[9]=temperature(Steam;x=x[9];P=p[9])

```

```

v[9]=volume(Steam;x=x[9];P=p[9])
u[9]=intenergy(Steam;x=x[9];P=p[9])
h[9]=enthalpy(Steam;x=x[9];P=p[9])
s[9]=entropy(Steam;x=x[9];P=p[9])
b[9]=(h[9]-h[0])-t[0]*(s[9]-s[0])

```

```
Ex[9]=m_dot*b[9]
```

"2.11 ESTADO 10 - ENTRADA DO TROCADOR DE CALOR (2)"

```

p[10]=p[11]
t[10]=temperature(Steam;s=s[10];P=p[10])
v[10]=volume(Steam;s=s[10];P=p[10])
u[10]=intenergy(Steam;s=s[10];P=p[10])
h[10]=enthalpy(Steam;s=s[10];P=p[10])
s[10]=s[9]
b[10]=(h[10]-h[0])-t[0]*(s[10]-s[0])

```

```
Ex[10]=m_dot*b[10]
```

"2.12 ESTADO 11 - ENTRADA DA CALDEIRA"

```

v[11]=volume(Steam;T=t[11];P=p[11])
u[11]=intenergy(Steam;T=t[11];P=p[11])
h[11]=enthalpy(Steam;T=t[11];P=p[11])
s[11]=entropy(Steam;T=t[11];P=p[11])
b[11]=(h[11]-h[0])-T[0]*(s[11]-s[0])

```

```
Ex[11]=m_dot*b[11]
```

"2.13 ESTADO 12 - ENTRADA DA VÁLVULA DE EXPANSÃO"

```

P[12]=P[2]
x[12]=0
t[12]=temperature(Steam;x=x[12];P=p[12])
v[12]=volume(Steam;x=x[12];P=p[12])
u[12]=intenergy(Steam;x=x[12];P=p[12])
h[12]=enthalpy(Steam;x=x[12];P=p[12])
s[12]=entropy(Steam;x=x[12];P=p[12])
b[12]=(h[12]-h[0])-t[0]*(s[12]-s[0])

```

```
Ex[12]=y*b[12]
```

"2.14 ESTADO 13 - ENTRADA DO TROCADOR DE CALOR (2)"

```

p[13]=p[5]
t[13]=temperature(Steam;h=h[13];P=p[13])
v[13]=volume(Steam;h=h[13];P=p[13])
u[13]=intenergy(Steam;h=h[13];P=p[13])

```


$h[13]=h[12]$
 $s[13]=\text{entropy}(\text{Steam};h=h[13];P=p[13])$
 $b[13]=(h[13]-h[0])-t[0]*(s[13]-s[0])$

$Ex[13]=y*b[13]$

"3. ANÁLISE DOS VOLUMES DE CONTROLE"

"3.1 CALDEIRA"

$Q_{\text{dot_cal}}=m_{\text{dot}}*(h[1]-h[11])+(m_{\text{dot}}-y)*(h[4]-h[3])$

"3.2 TURBINAS"

"3.2.1 TURBINA 1"

$W_{\text{dot_tur1}}=W_{\text{dot_tur1a}}+W_{\text{dot_tur1b}}$
 $W_{\text{dot_tur1a}}=m_{\text{dot}}*(h[1]-h[2])$
 $W_{\text{dot_tur1b}}=(m_{\text{dot}}-y)*(h[2]-h[3])$

"3.2.2 TURBINA 2"

$W_{\text{dot_tur2}}=W_{\text{dot_tur2a}}+W_{\text{dot_tur2b}}$
 $W_{\text{dot_tur2a}}=(m_{\text{dot}}-y)*(h[4]-h[5])$
 $W_{\text{dot_tur2b}}=(m_{\text{dot}}-y-z)*(h[5]-h[6])$

"3.3 CONDENSADOR"

$Q_{\text{dot_con}}=(m_{\text{dot}}-y-z)*(h[7]-h[6])$

"3.4 BOMBAS"

"3.4.1 BOMBA 1"

$W_{\text{dot_bom1}}=(m_{\text{dot}}-y-z)*(h[7]-h[8])$

"3.4.2 BOMBA 2"

$W_{\text{dot_bom2}}=m_{\text{dot}}*(h[9]-h[10])$

"3.5 TROCADORES DE CALOR"

"3.5.1 TROCADOR DE CALOR 1"

$z*h[5]+(m_{\text{dot}}-y-z)*h[8]+y*h[13]=m_{\text{dot}}*h[9]$

"3.5.2 TROCADOR DE CALOR 2"

$y*h[2]+m_{\text{dot}}*h[10]=y*h[12]+m_{\text{dot}}*h[11]$

"4. RANKINE"

$$\text{Eta} = W_{\text{dot_liq}} / Q_{\text{dot_cal}}$$

$$W_{\text{dot_liq}} = (W_{\text{dot_tur1}} + W_{\text{dot_tur2}}) + (W_{\text{dot_bom1}} + W_{\text{dot_bom2}})$$

$$F_{\text{T1_a}} = Ex[1] - (m_{\text{dot}} * b[2])$$

$$F_{\text{T1_b}} = (m_{\text{dot}} - y) * b[2] - (m_{\text{dot}} - y) * b[3]$$

$$F_{\text{T2_a}} = (m_{\text{dot}} - y) * (b[4] - b[5])$$

$$F_{\text{T2_b}} = (m_{\text{dot}} - y - z) * (b[5] - b[6])$$

APÊNDICE II

Para montagem e os cálculos das tabelas Recurso-Produto foi utilizado o software Excel e os valores obtidos no (EES).

Montagem e cálculo das tabelas Recurso-Produto

Ciclo Rankine com Sobreaquecimento

	F0	F1	F2	F3	F4
P0	0	a_{12}	0	0	0
P1	0	0	a_{23}	a_{24}	0
P2	a_{31}	0	0	0	a_{35}
P3	0	0	a_{43}	a_{44}	0
P4	0	0	a_{53}	a_{54}	0

$$a_{12} = Q_{cal}$$

$$a_{23} = [(B_1 - B_4)/B_1](B_1 - B_2)$$

$$a_{24} = [(B_1 - B_4)/B_1]B_2$$

$$a_{31} = W_{liq}$$

$$a_{34} = W_{bom}$$

$$a_{43} = (B_3/B_4)\{1 - [(B_1 - B_4)/B_1]\}(B_1 - B_2)$$

$$a_{44} = (B_3/B_4)\{1 - [(B_1 - B_4)/B_1]\}B_2$$

$$a_{53} = \{1 - (B_3/B_4)\}\{1 - [(B_1 - B_4)/B_1]\}(B_1 - B_2)$$

$$a_{54} = \{1 - (B_3/B_4)\}\{1 - [(B_1 - B_4)/B_1]\}B_2$$

Ciclo Rankine com Reaquecimento

	F0	F1	F2	F3	F4	F5
P0	0	a_{12}	0	0	0	0
P1	0	0	a_{23}	a_{24}	0	a_{26}
P2	a_{31}	0	0	0	a_{35}	0
P3	0	0	a_{43}	a_{44}	0	a_{46}
P4	0	0	a_{53}	a_{54}	0	a_{56}
P5	a_{61}	0	0	0	a_{65}	0

$$a_{12} = Q_{cal}$$

$$a_{23} = [(B_1 - B_6)/B_1](B_1 - B_2)$$

$$a_{24} = [(B_1 - B_6)/B_1]B_4$$

$$a_{26} = [(B_1 - B_6)/B_1](B_3 - B_4)$$

$$a_{31} = \{[(B_3 - B_4) - (B_1 - B_2)]/(B_3 - B_4)\}W_{liq}$$

$$a_{35} = \{[(B_3 - B_4) - (B_1 - B_2)]/(B_3 - B_4)\}W_{bom}$$

$$a_{43} = \{1 - [(B_6 - B_5)/B_6]\}\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}(B_1 - B_2)$$

$$a_{44} = \{1 - [(B_6 - B_5)/B_6]\}\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}B_4$$

$$a_{46} = \{1 - [(B_6 - B_5)/B_6]\}\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}(B_3 - B_4)$$

$$a_{53} = [(B_6 - B_5)/B_6]\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}(B_1 - B_2)$$

$$a_{54} = [(B_6 - B_5)/B_6]\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}B_4$$

$$a_{56} = [(B_6 - B_5)/B_6]\{1 - [(B_1 - B_6)/B_1]\}(B_3 - B_4)$$

$$a_{61} = \{1 - [(B_3 - B_4) - (B_1 - B_2)]/(B_3 - B_4)\}W_{liq}$$

$$a_{65} = \{1 - [(B_3 - B_4) - (B_1 - B_2)]/(B_3 - B_4)\}W_{bom}$$

Ciclo Rankine com sobreaquecimento e pré-aquecimento regenerativo

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
P0	0	a ₁₂	0	0	0	0	0	0
P1	0	0	a ₂₃	a ₂₄	0	a ₂₆	0	a ₂₈
P2	a ₃₁	0	0	0	a ₃₅	0	a ₃₇	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	a ₄₈
P4	0	0	a ₅₃	a ₅₄	0	a ₅₆	0	a ₅₈
P5	a ₆₁	0	0	0	a ₆₅	0	a ₆₇	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	a ₇₈
P7	0	0	a ₈₃	a ₈₄	0	a ₈₆	0	a ₈₈

$$a_{12} = Q_{cal}$$

$$a_{23} = [(B_1 - B_7)/B_1][B_1 - (\dot{m}b_2)]$$

$$a_{24} = [(B_1 - B_7)/B_1]B_3$$

$$a_{26} = [(B_1 - B_7)/B_1][(\dot{m} - y)(b_2 - b_3)]$$

$$a_{28} = [B_2/(B_2 + B_5)][(B_1 - B_7)/B_1](B_2 + B_5)$$

$$a_{31} = [W_{tura}/(W_{tura} + W_{turb})]W_{liq}$$

$$a_{35} = (B_{11}/B_{10})W_{bom2}$$

$$a_{37} = (B_{11}/B_{10})W_{bom1}$$

$$a_{48} = \{1 - [B_2/(B_2 + B_5)]\}(B_4/B_5)(B_2 + B_5)$$

$$a_{53} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}[1 - (B_6/B_7)][B_1 - (\dot{m}b_2)]$$

$$a_{54} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}[1 - (B_6/B_7)]B_3$$

$$a_{56} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}[1 - (B_6/B_7)][(\dot{m} - y)(b_2 - b_3)]$$

$$a_{56} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}[1 - (B_6/B_7)][B_2/(B_2 + B_5)](B_2 + B_5)$$

$$a_{61} = [W_{turb}/(W_{tura} + W_{turb})]W_{liq}$$

$$a_{65} = (B_{12}/B_{10})W_{bom2}$$

$$a_{67} = (B_{12}/B_{10})W_{bom1}$$

$$a_{78} = \{1 - [B_2/(B_2 + B_5)]\}[1 - (B_4/B_5)](B_2 + B_5)$$

$$a_{83} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}(B_6/B_7)[B_1 - (\dot{m}b_2)]$$

$$a_{84} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}(B_6/B_7)B_3$$

$$a_{86} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}(B_6/B_7)[(\dot{m} - y)(b_2 - b_3)]$$

$$a_{88} = \{1 - [(B_1 - B_7)/B_1]\}(B_6/B_7)(B_2 + B_5)$$

**Ciclo Rankine com sobreaquecimento, reaquecimento e pré-aquecimento
regenerativo**

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
P0	0	a ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	0	0	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	0	0	a ₂₁₀	a ₂₁₁	a ₂₁₂
P2	a ₃₁	0	0	0	0	0	0	a ₃₈	a ₃₉	0	0	0
P3	a ₄₁	0	0	0	0	0	0	a ₄₈	a ₄₉	0	0	0
P4	a ₅₁	0	0	0	0	0	0	a ₅₈	a ₅₉	0	0	0
P5	a ₆₁	0	0	0	0	0	0	a ₆₈	a ₆₉	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a ₇₁₀	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a ₈₁₀	0	0
P8	0	0	a ₉₃	a ₉₄	a ₉₅	a ₉₆	a ₉₇	0	0	a ₉₁₀	a ₉₁₁	a ₉₁₂
P9	0	0	a ₁₀₃	a ₁₀₄	a ₁₀₅	a ₁₀₆	a ₁₀₇	0	0	a ₁₀₁₀	a ₁₀₁₁	a ₁₀₁₂
P10	0	0	a ₁₁₃	a ₁₁₄	a ₁₁₅	a ₁₁₆	a ₁₁₇	0	0	a ₁₁₁₀	a ₁₁₁₁	a ₁₁₁₂
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a ₁₂₁₀	0	0

$$a_{12} = Q_{cal}$$

$$a_{23} = [(B_1 - B_{11})/B_1]F_2$$

$$a_{24} = [(B_1 - B_{11})/B_1]F_3$$

$$a_{25} = [(B_1 - B_{11})/B_1]F_4$$

$$a_{26} = [(B_1 - B_{11})/B_1]F_5$$

$$a_{27} = [(B_1 - B_{11})/B_1]B_6$$

$$a_{210} = (B_5 + B_8 + B_{13})[(B_1 - B_{11})/B_1][B_{13}/(B_5 + B_8 + B_{13})] + (B_5 + B_8 + B_{13})\{1 - [B_{13}/(B_5 + B_8 + B_{13})]\}[B_5/(B_5 + B_8)][(B_1 - B_{11})/B_1]$$

$$a_{211} = [(B_1 - B_{11})/B_1](B_2 - B_{12})$$

$$a_{212} = [(B_1 - B_{11})/B_1]B_{12}$$

$$a_{31} = [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]] [P_2/[(P_2 + P_3)]] W_{liq}$$

$$a_{38} = [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]] [P_2/[(P_2 + P_3)]] W_{bom1}$$

$$a_{39} = [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]] [P_2/[(P_2 + P_3)]] W_{bom2}$$

$$\begin{aligned}
a_{41} &= [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\{1 - [P_2/[(P_2 + P_3)]]\}W_{liq} \\
a_{48} &= [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\{1 - [P_2/[(P_2 + P_3)]]\}W_{bom1} \\
a_{49} &= [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\{1 - [P_2/[(P_2 + P_3)]]\}W_{bom2} \\
a_{51} &= [P_4/[(P_4 + P_5)]]\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{liq} \\
a_{58} &= [P_2/[(P_2 + P_3)]]\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{bom1} \\
a_{59} &= [P_2/[(P_2 + P_3)]]\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{bom2} \\
a_{61} &= \{1 - [P_4/[(P_4 + P_5)]]\}\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{liq} \\
a_{68} &= \{1 - [P_2/[(P_2 + P_3)]]\}\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{bom1} \\
a_{69} &= \{1 - [P_2/[(P_2 + P_3)]]\}\{1 - [(P_2 + P_3)/[(P_2 + P_3) + (P_4 + P_5)]]\}W_{bom2} \\
a_{710} &= (B_7/B_8)\{1 - [B_5/(B_5 + B_8)]\}\{1 - [B_{13}/(B_5 + B_8 + B_{13})]\}(B_5 + B_8 + B_{13}) \\
a_{810} &= [1 - (B_7/B_8)]\{1 - [B_5/(B_5 + B_8)]\}\{1 - [B_{13}/(B_5 + B_8 + B_{13})]\}(B_5 + B_8 \\
&\quad + B_{13}) \\
a_{93} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]F_2 \\
a_{94} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]F_3 \\
a_{95} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]F_4 \\
a_{96} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]F_5 \\
a_{97} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]B_6 \\
a_{910} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})](B_5 + B_8 + B_{13}) \\
a_{911} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})](B_2 + B_{12}) \\
a_{912} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}[1 - (B_9/B_{10})]B_{12} \\
a_{103} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})F_2 \\
a_{104} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})F_3 \\
a_{105} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})F_4 \\
a_{106} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})F_5 \\
a_{107} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})B_6 \\
a_{1010} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})(B_5 + B_8 + B_{13}) \\
a_{1011} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})(B_2 + B_{12}) \\
a_{1012} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}\{1 - [(B_{11} - B_{10})/B_{11}]\}(B_9/B_{10})B_{12} \\
a_{113} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]F_2 \\
a_{114} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]F_3 \\
a_{115} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]F_4 \\
a_{116} &= \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]F_5
\end{aligned}$$

$$a_{117} = \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]B_6$$

$$a_{1110} = \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}](B_5 + B_8 + B_{13})$$

$$a_{1111} = \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}](B_2 - B_{12})$$

$$a_{1112} = \{1 - [(B_1 - B_{11})/B_1]\}[(B_{11} - B_{10})/B_{11}]B_{12}$$

$$a_{1210} = [B_{13}/(B_5 + B_8 + B_{13})]\}(B_5 + B_8 + B_{13})$$