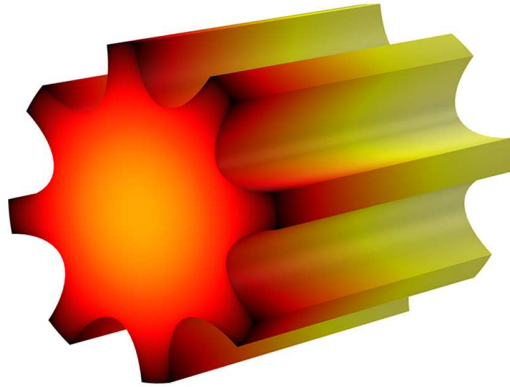




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Exergia de Motor a Gás Natural como Indicador de Manutenção

PAULO JOSÉ MARTINHO CARDOSO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Jorge Mendonça e Costa
Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Moura e Silva

Vogais:

Doutora Isabel Maria Pereira Bastos Malico
Doutor Jorge Mendonça e Costa

Dezembro de 2016

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
AGRADECIMENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS E TABELAS.....	vii
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS	ix
ABREVIATURAS	xi
ÍNDICES	xii
EXPOENTES	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO À EXERGIA.....	17
1.1 A COGERAÇÃO	17
1.2 EXERGIA	21
1.3 DEFINIÇÃO DE EXERGIA	22
2 ANÁLISE EXERGÉTICA – METODOLOGIA.....	24
2.1 BALANÇOS TERMODINÂMICOS.....	24
2.2 RENDIMENTOS ENERGÉTICO E EXERGÉTICO	26
3 CARACTERIZAÇÃO DA CENTRAL DE COGERAÇÃO	27
3.1 EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS	28
3.1.1 Sistema de Combustível.....	28
3.1.2 Sistema de Lubrificação.....	28
3.1.3 Sistema de Escape.....	28
3.1.3.1 Caldeira Recuperativa de Vapor.....	28
3.1.4 Grupo Gerador – Motor Alternativo	29
3.1.4.1 Calor Rejeitado pelo Motor	30

3.1.4.2	Dados Operacionais do Motor	31
3.1.4.3	Emissões do Motor	31
4	ANÁLISE TERMODINÂMICA E RENDIMENTOS DO MOTOR	32
4.1	PRESSUPOSTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA	33
4.1.1	Caracterização do Ar e do Gás Natural.....	34
4.1.1.1	Caudal do Ar de Combustão.....	34
4.1.1.2	Caudal do Ar do Gás Natural	35
4.1.1.3	Caudal da Mistura Ar – Gás Natural	36
4.1.2	Principais Variáveis no Balanço Termodinâmico.....	36
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	37
4.2.1	Entalpia e Entropia.....	37
4.2.1.1	Entalpia e Entropia com Condensação	39
4.2.2	Exergia Física e Exergia Química.....	39
4.2.3	Combustão	40
4.2.4	Condensação – Gases de Escape.....	41
4.2.5	Taxas	42
4.3	BALANÇO DOS COMPONENTES NO SISTEMA TERMODINÂMICO.....	42
4.3.1	Válvula Reguladora de Gás – VRG	42
4.3.2	Mistura Ar-Combustível – MAG.....	43
4.3.3	Válvula Reguladora da Mistura – VRM	44
4.3.4	Turbina e Compressor.....	44
4.3.5	Arrefecedores dos Sobrealimentadores	46
4.3.6	Conjunto Produtor de Trabalho do Motor	48
4.3.7	Alternador	50
4.3.8	Sistema Global	50
4.4	CÁLCULOS AUXILIARES.....	52

5	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	DISCUSSÃO.....	67
5.1.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	69
6	MANUTENÇÃO	70
6.1	MANUTENÇÃO E SUSTENTABILIDADE.....	70
6.2	MANUTENÇÃO, SUSTENTABILIDADE E EXERGIA	71
6.2.1	Manutenção e Fiabilidade	74
6.2.1.1	Técnicas de Manutenção	75
6.2.1.2	Fiabilidade	76
6.3	TERMODINÂMICA DA DEGRADAÇÃO (TD).....	79
6.3.1	Trabalho e Energia Livre	82
6.3.2	Mecanismos de Envelhecimento	82
6.3.3	Entropia de Degradação.....	84
6.3.3.1	Medição de Entropia.....	85
6.3.3.2	Entropia de Degradação de Sistemas Complexos	85
6.3.4	Exergia, Manutenção e fiabilidade	86
6.3.4.1	Exergia e Modelos de Degradação	86
6.3.4.2	Rotina de Manutenção Aplicada ao Grupo Gerador	89
6.4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO	96
6.4.1	Estudos para Trabalhos Futuros.....	96
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
7.1	CITAÇÕES	97
7.2	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	100
8	ANEXO I – P&ID DA CENTRAL DE COGERAÇÃO	105
9	ANEXO II – TABELA REN – GÁS NATURAL	106
10	ANEXO III – TABELAS E ELEMENTOS DE TERMODINÂMICA	107

11 ANEXO IV – TABELAS DE SZARGUT.....	129
12 ANEXO V – ELEMENTOS TÉCNICOS DO GRUPO GERADOR.....	138



Georges de La Tour – Maria Madalena Penitente - à Luz da Vela

∞ **TRANSITORIEDADE** ∞

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Jorge Mendonça e Costa, pelo apoio ao desenvolvimento do tema, paciência, resiliência e amizade.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. José Sobral, pela paciência, aceitação e amizade.

À minha Esposa, por me ter acompanhado pelas madrugadas adentro sem queixume, pela vigilância impessoal e pelo carinho e compreensão de sempre.

O meu muito Obrigado!!

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1.1	Cogeração e Produção Convencional	pág. 17
Figura 1.2	Utilização de Calor	pág. 18
Figura 1.3	Exemplo de Cogeração	pág. 19
Figura 1.4	Balanço térmico típico de um motor Caterpillar, ciclo Otto	pág. 20
Figura 1.5	Parcelas de Exergia	pág. 22
Figura 2.1	Mecanismos de Transferência de Calor	pág. 25
Figura 3.1	Circuito de AT de Refrigeração – Dados do Fluxo e Permutador	pág. 27
Figura 3.2	Circuito de BT de Refrigeração – Dados do Fluxo e Permutador	pág. 27
Figura 3.3	Circuitos Simplificados de Refrigeração AT e BT do Motor	pág. 27
Figura 3.4	Fotografia do Grupo Gerador Caterpillar® G3516E	pág. 29
Figura 4.1	Diagrama de Fluxos do Motor	pág. 32
Figura 4.2	Volume de Controlo – VRG	pág. 42
Figura 4.3	Volume de Controlo – MAG	pág. 43
Figura 4.4	Volume de Controlo – VRM	pág. 44
Figura 4.5	Volume de Controlo – Turbo-Compressor	pág. 44
Figura 4.6	Volume de Controlo – Compressor	pág. 45
Figura 4.7	Volume de Controlo – Turbina	pág. 46
Figura 4.8	Volume de Controlo – AS1+AS2	pág. 46
Figura 4.9	Volume de Controlo – AS1	pág. 46
Figura 4.10	Volume de Controlo – AS2	pág. 47
Figura 4.11	Volume de Controlo – Produção de Trabalho Total	pág. 49
Figura 4.12	Volume de Controlo – Alternador	pág. 50
Figura 4.13	Volume de Controlo – Sistema Global	pág. 51
Figura 6.1	Relação entre Factores de Manutenção	pág. 70
Figura 6.2	Parâmetros Efectivos na Fiabilidade e Sustentabilidade de um Sistema	pág. 73
Figura 6.3	Relações entre Sustentabilidade, Exergia e Ambiente	pág. 74
Figura 6.4	Função Probabilidade da Fiabilidade	pág. 77
Figura 6.5	Curva da Banheira	pág. 79
Figura 6.6	Taxas de Envelhecimento de Mecanismos de Degradação Associados	pág. 84
Figura 6.7	Cadeia de Manutenção	pág. 89
Figura 6.8	Algoritmo Exergético para Manutenção	pág. 91
Figura 6.9	Veio de Manivelas	pág. 92
Figura 6.10	Árvore de Falhas de um Veio de Manivelas (FTA)	pág. 93
Figura 6.11	Geração de Entropia e nº de Ciclos para a Fadiga	pág. 94
Figura 6.12	Evolução da Temperatura e Ocorrência da Falha	pág. 94

Tabela 3.1	Rampa de Gás – Alimentação do Grupo	pág. 28
Tabela 3.2	Sistema de Lubrificação do Motor	pág. 28
Tabela 3.3	Sistema de Escape do Motor	pág. 28
Tabela 3.4	Dados da Caldeira	pág. 29
Tabela 3.5	Dados do Motor	pág. 30
Tabela 3.6	Balanço Térmico do Motor	pág. 30
Tabela 3.7	Dados Adicionais do Motor	pág. 31
Tabela 3.8	Emissões do Motor	pág. 31
Tabela 4.1	Legendas do Diagrama do Motor	pág. 33
Tabela 4.2	Características do Ar de Combustão	pág. 34
Tabela 4.3	Fracções Molares do Gás Natural	pág. 35
Tabela 4.4	Massas Molares e Densidades dos Componentes do Gás Natural	pág. 35
Tabela 4.5	Principais Parâmetros para Análise do Sistema Termodinâmico	pág. 36
Tabela 4.6	Fracções dos Componentes das Substâncias por Fluxo	pág. 52
Tabela 4.7	Entalpia e Entropia Molar para os Fluxos Líquidos	pág. 53
Tabela 4.8	Entalpia Molar para os Fluxos Gasosos	pág. 54
Tabela 4.9	Pressões Parciais dos Componentes das Substâncias	pág. 54
Tabela 4.10	Entropia Molar para os Fluxos Gasosos	pág. 55
Tabela 4.11	Tabela Resumo da Entalpia e Entropia Molar por Fluxo Gasoso	pág. 55
Tabela 4.12	Entalpia Molar a Condições de Referência	pág. 56
Tabela 4.13	Pressões Parciais P_{0ji}	pág. 57
Tabela 4.14	Entropia Molar às Condições de Referência por Componente	pág. 57
Tabela 4.15	Entropia e Entalpia Molar às Condições de Referência por Fluxo	pág. 58
Tabela 4.16	Exergia Molar por Fluxo	pág. 59
Tabela 4.17	Fracções Molares – Condensação – Fluxos Gasosos	pág. 60
Tabela 4.18	Pressões Parciais nos Fluxos com Condensação e Entropia de Ref. ^{cia}	pág. 61
Tabela 4.19	Resumo das Propriedades após Condensação	pág. 63
Tabela 4.20	Origem dos Dados Temperatura e Pressão	pág. 64
Tabela 4.21	Transferência de Calor	pág. 64
Tabela 5.1	Propriedades Termodinâmicas do Sistema	pág. 65
Tabela 5.2	Entropia Gerada	pág. 65
Tabela 5.3	Exergia Destruída	pág. 66
Tabela 5.4	Rendimentos	pág. 66
Tabela 6.1	Mecanismos Termodinâmicos de Envelhecimento	pág. 83

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AG	Taxa de Envelhecimento
C_p	Calor Específico
D	Degradação
D_0	Parâmetro Adicional de Degradação Inicial
D_c	Degradação Crítica
ΔH	Variação de Entalpia
D_p	Razão Entre Energia e Exergia
ΔS	Variação de Entropia
ΔS_{irr}	Variação de Entropia nas Irreversibilidades
$\dot{\epsilon}$	Taxa ou Grau de Perfeição
\dot{E}	Taxa de Energia
ϕ	Energia Livre
F(t)	Função Probabilidade Acumulada de Falhas
f(t)	Função Probabilidade Instantânea de Falhas
g	Aceleração Gravítica
$\dot{\gamma}_D$	Taxa de Destruição de Exergia
\bar{h}_i^0	Entalpia Molar nas Condições de Referência
\bar{h}	Entalpia Molar
h_0	Entalpia no estado de referência ou estado morto
h_f^0	Entalpia de Formação
η_I	Eficiência Energética
η_{II}	Eficiência Exergética
\dot{I}	Taxa de Irreversibilidade
λ	Taxa de Avarias ou Relação Estequiométrica
m	Massa
MTBF	Tempo Médio entre Falhas
MTTR	Tempo Médio entre Reparações
\dot{n}	Caudal Molar
n	Número de Moles
OEE	Eficiência Global do Equipamento
P_0	Pressão no estado de referência ou estado morto
Q	Calor
Q	Taxa de Transferência de Calor
R	Constante dos Gases Perfeitos
R(t)	Função Fiabilidade
RCM	Manutenção Centrada na Fiabilidade
\bar{s}_i^0	Entropia Molar nas Condições de Referência
\dot{S}	Taxa de Entropia
\bar{s}	Entropia molar
S	Entropia

s_0	Entropia Molar Absoluta
S_g	Entropia Total Gerada
\dot{S}_{gen}	Taxa de Geração de Entropia
SI	Indicador de Sustentabilidade
S_{ic}	Valor Crítico de Geração de Entropia
T	Temperatura
T_0	Temperatura no estado de referência ou estado morto
TPM	Manutenção Total Preventiva
v	Volume
U	Energia Interna
U_0	Energia Interna no estado de referência ou estado morto
v	Velocidade
v_0	Velocidade no estado de referência ou estado morto
W	Trabalho
\bar{x}	Exergia molar
x	Exergia Específica
\dot{X}	Taxa de Exergia
X_c	Exergia Cinética
X_{ch}	Exergia Química
\dot{X}_D	Taxa de Exergia Destruída
X_f	Exergia Física
X_p	Exergia Potencial
y	Fracção Molar
y^*	Fracção Molar Após Condensação
z	Cota Altimétrica

ABREVIATURAS

AS1	1ª Etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador
AS2	2ª Etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador
AT	Alta Temperatura
BT	Baixa Temperatura
CPR	Compressor
ETA	Event Tree Analysis (Árvore de Eventos)
FBA	Fishbone Analysis (Diagrama de Causa e Efeito ou de Ishikawa)
FMEA	Failure Mode Effects Analysis (Análise dos Modos de Falhas)
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis (Análise dos Modos de Falhas e Criticidade)
FTA	Fault Tree Analysis (Árvore de Falhas)
OEE	Overall Equipment Efficiency (Rendimento Global do Equipamento)
PFA	Predictive Failure Analysis (Análise de Previsão de Falhas)
PTM	Produtor de Trabalho no Motor
PTO	Permutador de Óleo
RCA	Root Cause Analysis (Análise da Raiz da Causa)
TRB	Turbina
TD	Termodinâmica da Degradação
TPM	Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)
BCM	Bloco do Motor
ALT	Alternador
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança)
MPM	Maintenance Performance Measurement (Manutenção Baseada na Avaliação e Desempenho)
RCM	Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Fiabilidade)

ÍNDICES

0	Relativo ao Ponto Morto
ALT	Alternador
c	Cinética
ch	Química
Δ	Variação
D	Destruição
e	Entrada (Input)
f	Falha ou Física ou Final
GEP	Gases de Escape
ger	Geração
i	Relativo ao Ponto do Fluxo
i	Inicial
IRR	Irradiação
j	Relativo ao Componente da Substância
p	Potencial
ref	Referência
s	Saída (Output)
u	Útil
vc	Volume de Controlo
rev	Reversível

EXPOENTES

0	Relativo a Condições de Referência
0	Relativo à Entalpia de Formação
*	Relativo às Fracções de Fluxos com Condensação
.	Taxa
ch	Química
f	Físico

RESUMO

O trabalho, aqui desenvolvido, é dividido em duas partes quase distintas. Na primeira parte, o trabalho tem por objectivo a apresentação de valores de exergia de um grupo gerador a gás natural, sendo a máquina principal de uma central de cogeração a gás natural, pelo que se realizam um conjunto de análises termodinâmicas do sistema, ou seja, do grupo gerador.

A central de cogeração onde se insere o grupo gerador é a central térmica do hospital Fernando Fonseca, situado na Amadora, sendo constituída por dois grupos geradores. Na realidade esta central é composta por duas partes distintas:

- 1º lote, produção de electricidade e energia térmica – calor;
- 2º lote, transformação secundária e aproveitamento do calor disponibilizado pelo lote 1. Os sistemas que aproveitam esta transformação são essencialmente o sistema de AVAC, com produção de frio através de um chiller de absorção e produção de vapor saturado através de uma caldeira, para a lavandaria local.

O fornecimento do 1º lote foi da responsabilidade do representante da Caterpillar em Portugal. As principais máquinas produtoras, responsáveis pela disponibilização da energia térmica são dois grupos geradores Caterpillar[®], compostos por motores a gás natural funcionando em ciclo Otto. Cada um dos grupos exporta para a rede eléctrica 1600 kW eléctricos, pelo respectivo ponto de interligação.

Para além da análise exérgica de um dos grupos da central de cogeração, a exergia será utilizada para associar os fenómenos de degradação de bens, à manutenção e às técnicas de manutenção. Assim a segunda parte do trabalho é dedicada a relacionar o conceito de exergia, energia e entropia com a manutenção e o possível encadeamento em técnicas de manutenção.

ABSTRACT

This study is divided into two major parts, almost distinctive between them. The first part, has the essential goal of showing the exergy figures for a gas genset, as the main machine engaged in a combined heat and power plant, through a thermodynamic analysis.

The CHP plant is the Fernando Fonseca Hospital thermal plant, in Amadora city, nearby Lisbon. This plant has two major different systems:

- First part (lot 1) of this CHP is where lies the heat production and produces electricity, as well;
- Second part (lot 2) of the CHP and its primary function is to take the available heat from lot 1 and transform it in useful energy for the HVAC system (there is an absorption chiller) and also to produce saturated steam for the local laundry, with a steam boiler installed for this CHP.

The supply of the lot 1 was done by the Portuguese Caterpillar® dealer whereby the main heat producers are two Caterpillar® generator sets, with engines working on natural gas, under the Otto cycle and these gensets deliver 1600 kW each to the national utility.

Beyond exergy analysis of this cogeneration plant, the exergy will be used to associate the concept of exergy to the Maintenance and Maintenance techniques. So the second part of this work is devoted to relate and chain the concept of exergy, energy and entropy with the Maintenance, linking them to the thermodynamics of degradation.

DECLARAÇÃO

Este trabalho foi redigido de acordo com a ortografia Portuguesa anterior ao acordo ortográfico vigente.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudo da forma como se determina o cálculo da exergia para vários equipamentos de uma instalação de cogeração, foi realizada através do estudo de várias literaturas existentes no mercado literário acadêmico, pelo estudo de inúmeros “papers” com pequenos estudos relativos à exergia e ainda tendo como suporte de pesquisa a internet e os estudos já realizados de Termodinâmica, Máquinas e Manutenção, realizados no ISEL, ao longo do meu percurso escolar como aluno desta escola.

Da variada literatura pesquisada, destacam-se alguns estudos, como o de Kotas, 1995 Çengel et Boles, 2005, J. Moran et Shapiro, 2006. Relativamente às equações químicas necessárias para acerto da equação da combustão, foram também consultados Heywood, 1988 e Martins, 2006.

No Capítulo da Manutenção, também para além dos inúmeros “papers” pesquisados entre vários livros, destaca-se a consulta de autores como Feinberg et Crowe, 2001 e Feinberg, 2016 onde é explorada a relação entre degradação termodinâmica dos bens e a manutenção. Na áreas de manutenção “pura” foram consultados Ben-Daya et al., 2009, Ushakov, 1994, e ainda Dhillon, 2006. Foi também crucial a pesquisa de várias análises experimentais realizadas por alguns investigadores no campo da análise termodinâmica da degradação dos bens.

1 INTRODUÇÃO À EXERGIA

1.1 A COGERAÇÃO

Com o aumento exponencial a nível global de procura de energia e os custos associados à sua produção, a tendência de utilizar a energia consumida de forma mais racional tem aumentado, como preconizado por Torres (1999).

A cogeração é uma alternativa tecnológica, onde várias formas de energia produzidas são simultaneamente aproveitadas. Utiliza-se o potencial energético do combustível (energia química – motor alternativo) que é transformado em trabalho mecânico, que por sua vez dá origem à produção eléctrica do alternador acoplado ao motor e ao calor gerado no motor que é aproveitado em parte nos vários processos industriais a jusante da cogeração.

A cogeração surge como uma oportunidade para a competitividade das empresas e como uma vantagem ambiental, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis através de processos convencionais. A cogeração é um meio de produção centralizada de electricidade e calor; de uma forma simplificada temos a seguinte figura, com vantagens significativas para a cogeração:

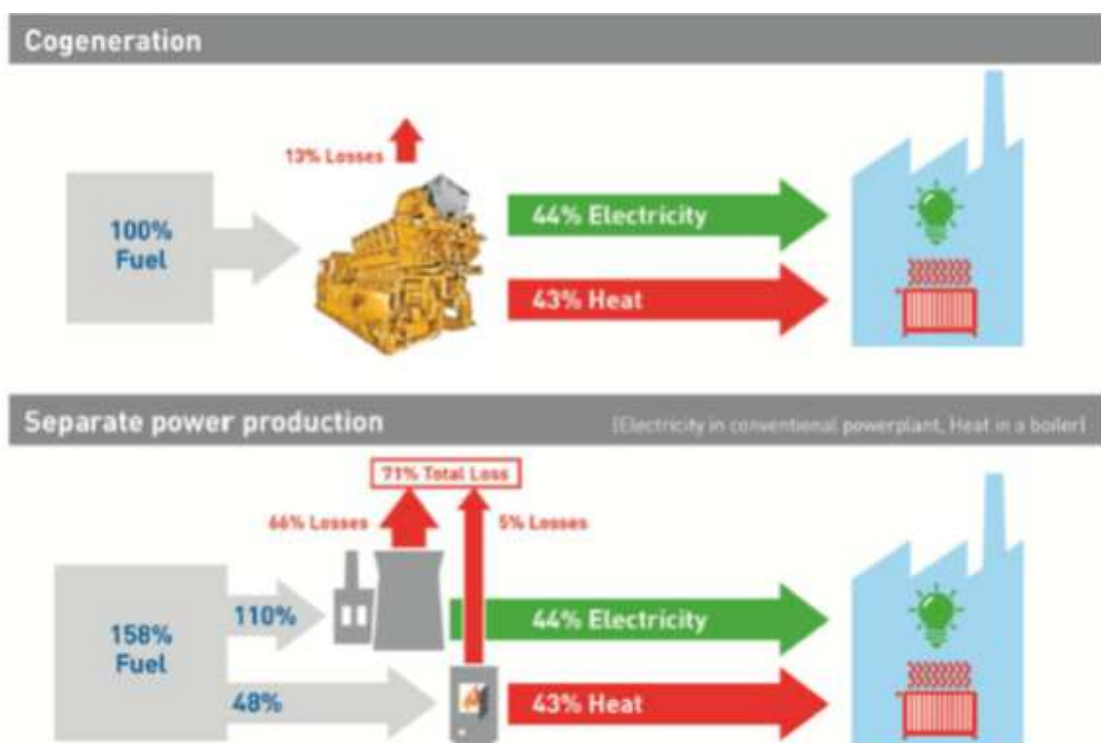


Figura 1.1 – Cogeração e Produção Convencional (fonte: Caterpillar®)

Nas cogerações são utilizadas máquinas térmicas, tais como as turbinas (seguindo os ciclos de Brayton e Rankine), motores alternativos de combustão interna (ciclos Diesel ou Otto) e ainda mais recentemente as pilhas de combustível e as micro-turbinas. As máquinas térmicas têm sido de facto a tecnologia motriz mais utilizada nas últimas décadas e por conseguinte, mais desenvolvidas. São estas ainda que permitem desenvolver os conceitos de trieração e até de quadri-geração (com o aproveitamento do CO₂).

As vantagens da cogeração podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Economia de energias fósseis primárias na ordem dos 25%;
- Redução de emissões poluentes devido sobretudo à utilização do gás natural;
- Aumento do aprovisionamento energético e da estabilidade da rede eléctrica, através do fornecimento de electricidade à rede eléctrica e do alívio dos picos de consumo em determinados períodos do dia (a produção de frio no verão é atenuada nas trierações).
- Benefícios económicos, pela redução da factura energética das indústrias que beneficiam do aproveitamento energético, do aumento da fiabilidade da instalação devido à sua maior autonomia e independência do exterior, aumento do emprego local.

Um mesmo equipamento abre a possibilidade de se produzir calor com um conjunto de aproveitamentos, como se verifica no exemplo da figura seguinte:

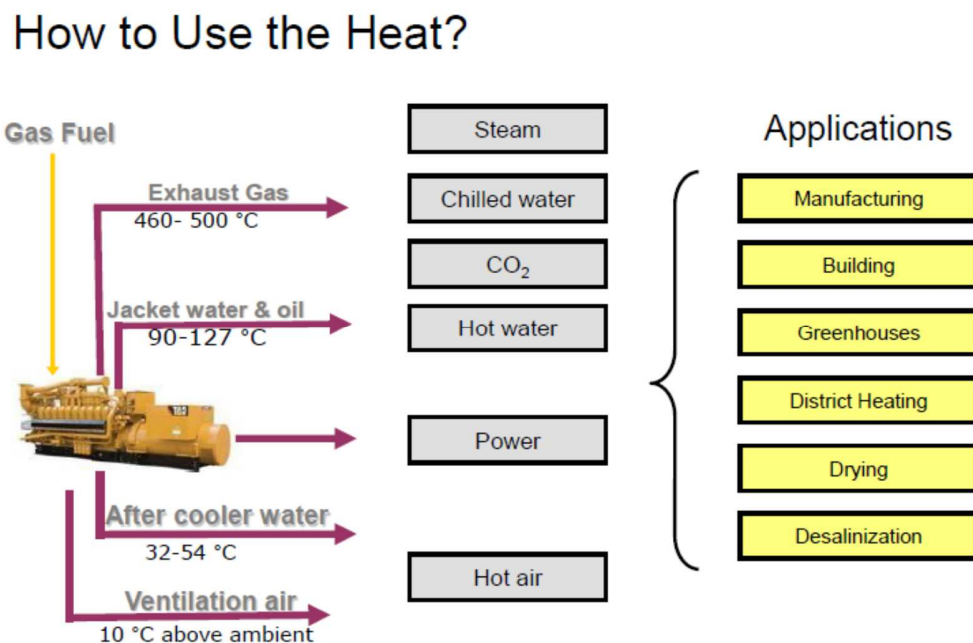


Figura 1.2 – Utilização do Calor (fonte: Caterpillar®)

Como se verifica, as hipóteses de utilização do calor são bastante diversificadas. Para além da possibilidade do aquecimento de água quente (utilização em dessalinização, aquecimento de águas sanitárias, produção de vapor, etc.), o calor pode ser ainda utilizado no conceito de trigeração, onde se produz adicionalmente frio através de chiller de absorção (para sistemas de AVAC em minas, em hospitais, etc.), e em quadri-geração, onde se pode também aproveitar o CO₂, que pode ser utilizado, por exemplo, em estufas na produção de alimentos. A figura seguinte apresenta mais um exemplo de utilização de aproveitamento térmico de uma cogeração:

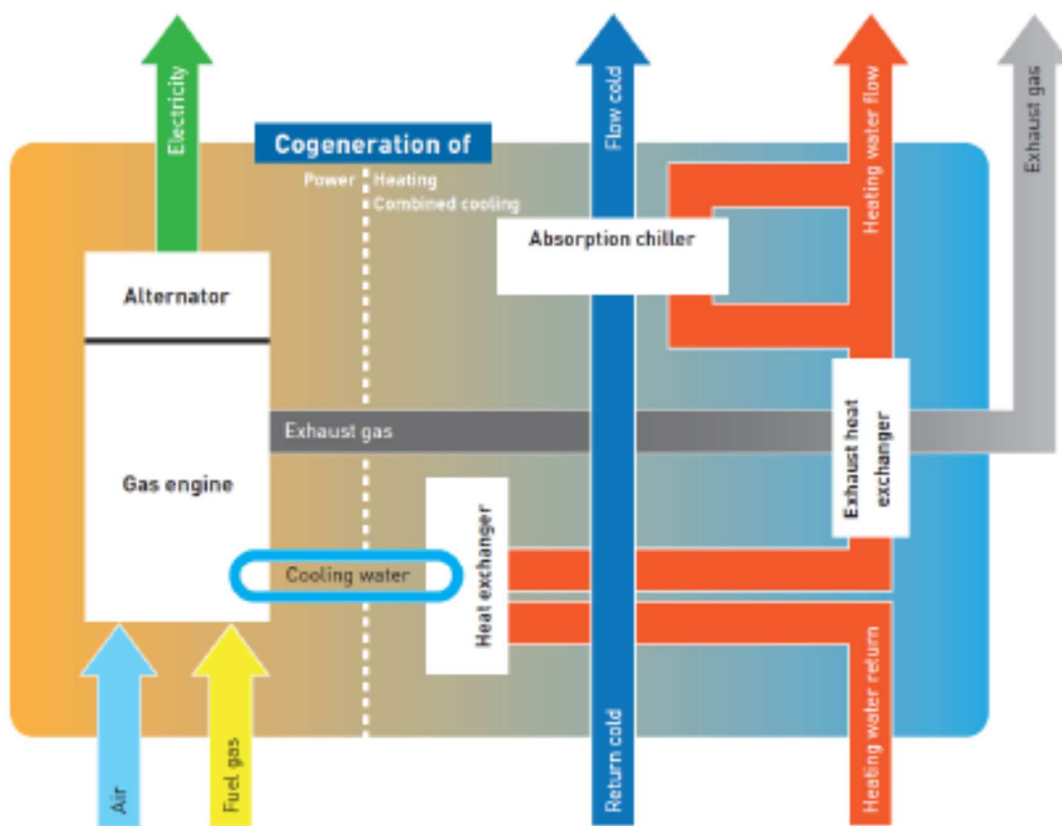


Figura 1.3 – Exemplo de Cogeração (fonte: Caterpillar®)

O balanço térmico de um motor de ciclo Otto, é tipicamente idêntico ao de um motor Caterpillar, de acordo com a figura ilustrativa, seguinte:

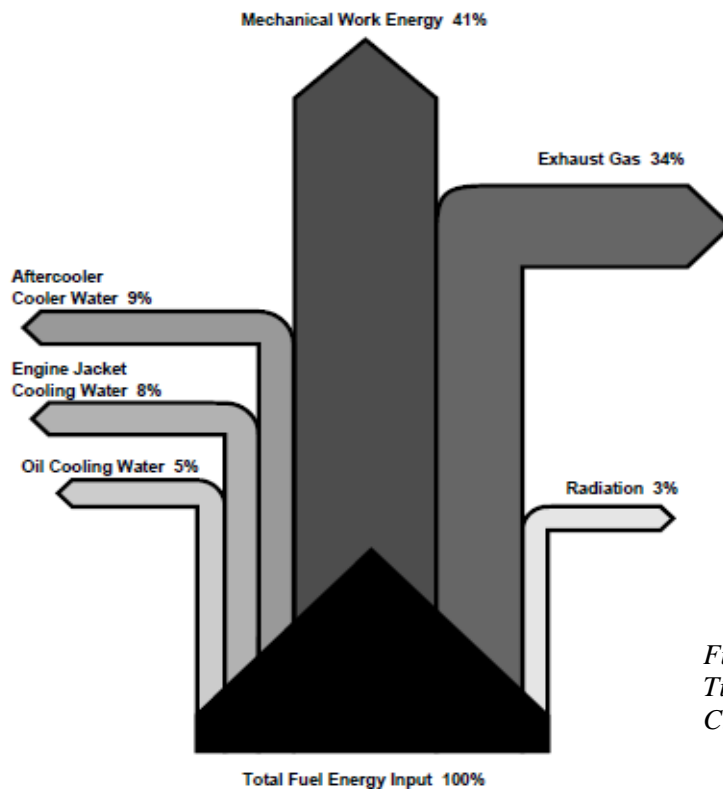


Figura 1.4 – Balanço Térmico Típico de um Motor Caterpillar®, Ciclo Otto (fonte: Caterpillar®)

Daqui observa-se o balanço pela primeira lei da termodinâmica que $\Delta U = 0$, dado que os estados iniciais e finais do ciclo Otto são os mesmos, a energia interna desses estados é igual. Então:

$$\Delta U = W + Q = 0 \quad (1.1)$$

$Q = -W$, O que significa que o motor realiza trabalho sobre o exterior. Na prática significa que:

$$W_{engine} = Q_{work} + Q_{exhaust} + Q_{radiation} + Q_{aftercooler} + Q_{jacket} + Q_{oil} \quad (1.2)$$

Na realidade o trabalho útil resultante do potencial químico do combustível é tipicamente cerca de 41% - 43%, o resto da energia é rejeitada e se não for aproveitada será perdida para o exterior. Desta forma o rendimento mecânico de uma máquina térmica, operando em ciclo Otto, tem uma ordem de grandeza como a indicada na figura anterior. Faz todo o sentido a aplicação da cogeração para aproveitamento térmico da energia libertada pelo motor; apenas a energia perdida por radiação não tem aproveitamento tecnológico prático, devido à caracterização muito própria da dispersão do calor sob a forma de radiação.

1.2 EXERGIA

A análise deste sistema apenas pela 1ª lei da termodinâmica não contabiliza as perdas de energia nem onde ocorrem as irreversibilidades. Torres, 1999, aponta para que este tipo de análises deve ser complementado pela 2ª lei da termodinâmica, ou análise exérgica. Segundo Moreira, 2004, a análise exérgica terá sido iniciada por F. Bosnjakovic, em 1938.

A energia não pode ser criada ou destruída considerando como última vizinhança, fechada, o nosso próprio Universo.

Quando ocorre uma transformação, o balanço energético avalia as perdas energéticas ocorridas. A energia perdida, não é verdadeiramente perdida, mas sim convertida em outra forma de baixo valor energético que não é aproveitada ou convertida, muitas das vezes por incapacidade tecnológica e económica ou até mesmo por razões de carácter político. Há assim, a necessidade de se poder avaliar a qualidade dos fluxos energéticos dentro das transformações termodinâmicas. Segundo Tsatsaronis (1993), a avaliação exérgica permite complementar a análise energética da seguinte forma: uma melhor forma, de avaliar a magnitude da energia perdida em relação à energia total fornecida; uma forma mais completa de avaliar a energia do ponto de vista termodinâmico; uma variável para definir e relacionar a interacção entre a exergia desejada e a exergia necessária ao processo.

O conceito de exergia vem ao encontro desta necessidade e expressa a qualidade de uma determinada quantidade de energia em relação à sua vizinhança, indicando qual a parte desta energia que pode ser convertida em trabalho útil.

Existem várias formas de definir exergia, do ponto de vista qualitativo, Tsatsaronis (1993), apresenta uma definição ajustada para o presente trabalho: a exergia é o trabalho útil que se pode obter de uma fonte de energia, quando este é levado de um estado inicial, até que atinja o estado final de equilíbrio termodinâmico com o ambiente de referência (estado final de referência).

1.3 DEFINIÇÃO DE EXERGIA

A definição matemática de exergia é apresentada na equação seguinte, a partir da aplicação de balanços de energia e de entropia a um sistema interagindo com o meio ambiente e que permite calcular a exergia do sistema sujeito a um processo reversível, partindo de um determinado estado, até às condições ambiente de referência.

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{v^2}{2} + mgz \quad (1.3)$$

As propriedades com índice zero subscrito e P_0 , são as mesmas em relação ao estado de referência, comumente designado por *estado morto* (“dead state”). A exergia é uma propriedade termodinâmica que depende do ambiente de referência do sistema termodinâmico; se o sistema e o ambiente de referência entrarem em equilíbrio, a exergia é zero (apesar de possuírem energia).

A Exergia, X , segundo Kotas (1995), pode ser dividida em quatro componentes: exergia cinética X_c , exergia potencial X_p , exergia física X_f e a exergia química X_{ch} , expressas em (1.3), pelo que simplificadaamente:

$$X = X_p + X_c + X_f + X_{ch} \quad (1.4)$$

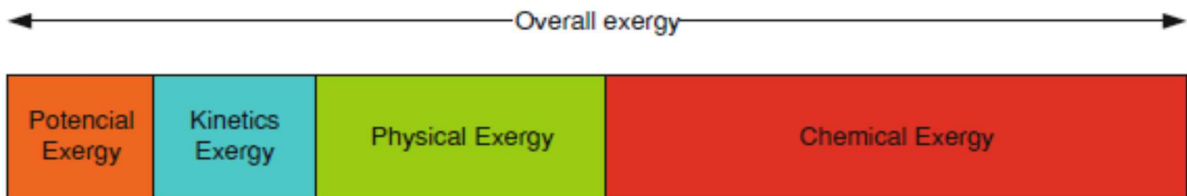


Figura 1.5 – Parcelas da Exergia (Fonte: *Exergy Costing and Renewability Analysis of Energy Conversion Processes – Part 2 – Oliveira Júnior, S.*)

A exergia cinética é a energia cinética onde a velocidade relativa é a da superfície da Terra:

$$X_c = \frac{m \cdot v_0^2}{2} \quad (1.5)$$

A exergia potencial é a energia potencial onde o referencial é a superfície da Terra:

$$X_f = m \cdot g_0 \cdot z_0 \quad (1.6)$$

A exergia química de acordo com Kotas (1995), é expressa pela relação:

$$X_{ch} = \sum_j y_{ji} \cdot x_{ch} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_j [y_j \cdot \ln(y_j)], \quad (1.7)$$

onde y_j é a fracção molar dos constituintes da substância em análise. No entanto a formulação da Exergia química não é unânime entre os autores. Sotomonte (2009), afirma que quando o sistema está em equilíbrio com o ambiente de referência, ainda é possível obter-se trabalho. Já Kotas (1995), considera que a exergia química define-se como o máximo de trabalho obtido quando se leva a substância desde o estado morto, ou estado de referência, T_0, P_0 , ao equilíbrio termodinâmico com o estado de referência, através de processos químicos e físicos reversíveis, com transferência de calor e troca de massa.

A Exergia física é o trabalho máximo conseguido através de processos reversíveis, quando a matéria é levada do estado inicial P e T ao estado de pressão e temperatura de referência, P_0 e T_0 . Quando P e T se afastam da referência, desenvolve-se um potencial de trabalho, onde a exergia pode ser determinada pela equação (Bejan et al., 1996):

$$X_f = (h - h_0) + T_0 \cdot (s - s_0) \quad (1.8)$$

Em que h é a entalpia e s , a entropia, T_0 é a temperatura do estado de referência (“estado morto”). A entropia é responsável pela degradação da energia, pois uma parte do fluxo energético acaba por se converter em calor à temperatura ambiente e deixa de ser recuperável para os processos do sistema. Por esta razão, a análise pela primeira lei (análise energética) não é suficiente pelo que se impõe a análise exérgica para superar as limitações da 1ª lei da termodinâmica. Pode-se dizer que a exergia é uma medida do potencial de um fluxo de energia para ser transformado em energia de alta qualidade, sujeito a perdas menores. As irreversibilidades que ocorrem num processo termodinâmico, destroem parte da energia inicial e disponível; a 1ª lei, não considera outras formas de energia além da energia mecânica e térmica; então é expectável que a eficiência exérgica seja menor do que o rendimento energético, já a exergia leva em conta irreversibilidades que degradam a energia inicial, mas que a primeira lei não permite expressar.

A expressão (1.8) deriva do facto de a entropia nunca diminuir¹, de acordo com a segunda lei da termodinâmica (sistema fechado), e indica o trabalho possível de realizar pela variação de entropia. A irreversibilidade de um evento acarreta uma mudança na entropia: $\Delta S - \Delta S_{irr}$. Então:

$$X_f = \Delta H + T_0 \times (\Delta S - \Delta S_{irr}) \quad (1.9)$$

¹ Mas num sistema aberto a entropia pode diminuir desde que a entropia do meio envolvente aumente mais do que a do sistema diminui e que $\Delta S_{sist} + \Delta S_{meio} \geq 0$

$$\text{a exergia destruída, } X_D, \text{ é: } T_0 \times \Delta S_{irr} \quad (1.10)$$

Então (1.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$X = X_p + X_c + X_f + X_{ch} - X_D \quad (1.11)$$

2 ANÁLISE EXERGÉTICA – METODOLOGIA

A análise termodinâmica do grupo gerador passa pela definição dos volumes de controle associados aos vários componentes do motor (e alternador) e na aplicação de balanços de massa, energia, entropia e exergia. Desta forma será possível avaliar também as relações entre trabalho, calor e rendimento energético e exergético.

2.1 BALANÇOS TERMODINÂMICOS

Consideram-se os vários regimes dos vários fluxos nos componentes da máquina, como regimes em escoamento permanente. Assim, considerando os vários balanços, temos:

- Balanço de Massa

O fluxo de massa à entrada tem de ser igual ao fluxo de massa à saída do volume de controle

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.1)$$

- Balanço de Energia

A energia total do sistema é constante

$$\sum \dot{E}_e = \sum \dot{E}_s \quad (2.2)$$

Considerando a transferência de calor, o balanço de energia pode ser escrito de acordo com a seguinte equação (Çengel et Boles, 2006):

$$Q_{vc} - W_{vc} + \sum \dot{m}_e \cdot h_e - \sum \dot{m}_s \cdot h_s = 0 \quad (2.3)$$

- Balanço de Entropia

A entropia é gerada devido à existência de irreversibilidades em todo o sistema termodinâmico. A taxa de geração de entropia permite dar expressão ao surgimento de entropia. Considerando ainda os balanços de massa e de calor, ter-se-á, \dot{S}_{ger} :

$$\dot{S}_{ger} + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T_{vc}} + \sum \dot{m}_e \cdot h_e - \sum \dot{m}_s \cdot h_s = 0 \quad (2.4)$$

A variação de entropia no volume de controle (vc), é nula (Çengel e Boles, 2006). A entropia escoá-se do volume de controle através de massa e calor:

$$\dot{S}_{calor} = \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T_{vc}} \quad (2.5)$$

$$\dot{S}_{massa} = \sum \dot{m}_e \cdot h_e - \sum \dot{m}_s \cdot h_s \quad (2.6)$$

Considera-se T_{vc} , a temperatura no volume de controle e Q_{vc} o calor transferido pelo volume de controle.

- Balanço de Exergia

O trabalho reversível \dot{W}_{rev} , é o trabalho máximo útil que pode ser produzido durante um processo. Quando o estado final do processo é o estado de referência, \dot{W}_{rev} iguala a exergia. Considera-se também que a diferença entre o trabalho útil e o trabalho reversível é chamado de Irreversibilidade (Çengel et Boles, 2006):

$$\dot{I} = \dot{W}_u - \dot{W}_{rev} \quad (2.7)$$

A Irreversibilidade de um sistema é a exergia destruída. Ou seja, trabalho potencial desperdiçado, ou oportunidade de realizar trabalho, perdida. Irreversibilidades podem ser fenómenos como a fricção, reacções químicas, transferência de calor, misturas, etc. Qualquer sistema que gere entropia, destrói exergia. A exergia destruída é proporcional à entropia criada:

$$\dot{I} = \dot{X}_D = T_0 \dot{S}_{gen} \geq 0 \quad (2.8)$$

Num sistema fechado o balanço da exergia é:

$$\dot{X}_e - \dot{X}_s - \dot{X}_D = \Delta \dot{X}_{sistema} \quad (2.9)$$

Ou seja, a mudança de exergia de um sistema é igual à diferença entre a exergia líquida e a exergia destruída.

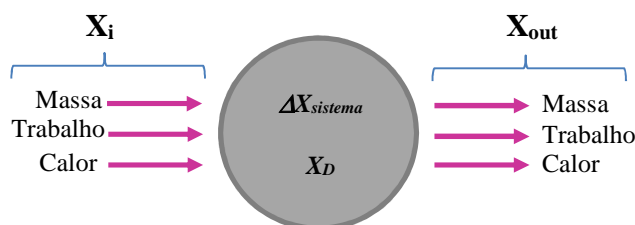


Figura 2.1 – Mecanismo de Transferência de Exergia

Segundo Bejan et al., 1996, o balanço geral de exergia, considerando massa, calor e trabalho, é:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{vc}}\right) \dot{Q}_{vc} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \cdot x_e - \sum \dot{m}_s \cdot x_s - \dot{X}_D = 0 \quad (2.10)$$

Onde podemos considerar:

$$\dot{X}_{calor} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{vc}}\right) \cdot \dot{Q}_{vc} \quad (2.11)$$

$$\dot{X}_{massa} = \sum \dot{m}_e \cdot x_e - \sum \dot{m}_s \cdot x_s \quad (2.12)$$

$$\dot{X}_{trabalho} = \dot{W} \quad (2.13)$$

\dot{X}_D , representa a exergia destruída devido ao efeito das irreversibilidades (equação 2.8).

2.2 RENDIMENTOS ENERGÉTICO E EXERGÉTICO

De acordo com a 1ª lei da termodinâmica o rendimento energético de um sistema, traduz-se pela razão entre a energia ou resultado de saída do sistema, pela energia fornecida ao sistema.

Ou seja:

$$\eta_I = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} \quad (2.14)$$

Onde os subscritos s e e são relativos à saída e entrada respectivamente. Introduzindo a 2ª lei da termodinâmica é possível definir rendimento exergético (Moran et Shapiro, 2006), como:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\dot{X}_D}{\dot{X}_{COMB}} \quad (2.15)$$

Szargut et al., 1998, considera ainda outro parâmetro para avaliar a exergia como taxa, ou grau de perfeição termodinâmico, e como sendo:

$$\epsilon = \frac{\dot{X}_{saída}}{\dot{X}_{entrada}} \quad (2.16)$$

Considerando ainda como taxa de destruição de exergia num sistema, a seguinte relação:

$$\gamma_D = \frac{\dot{X}_D}{\dot{X}_{D\ Total}} \quad (2.17)$$

Este parâmetro compara a taxa de destruição local com a taxa de destruição total, eventualmente de todo o sistema (Bilgen et Kaygusuz, 2008).

3 CARACTERIZAÇÃO DA CENTRAL DE COGERAÇÃO

O diagrama P&ID representa simplificada a cogeração nos seus vários equipamentos, bem como a recuperação térmica subjacente à instalação. Este encontra-se nos anexos e trata o lote de fornecimento nº1, onde se insere o grupo gerador, objecto da análise exergética. As figuras seguintes representam partes do P&ID total e têm por objectivo facilitar a visualização das condições de escoamento externas aos motores.

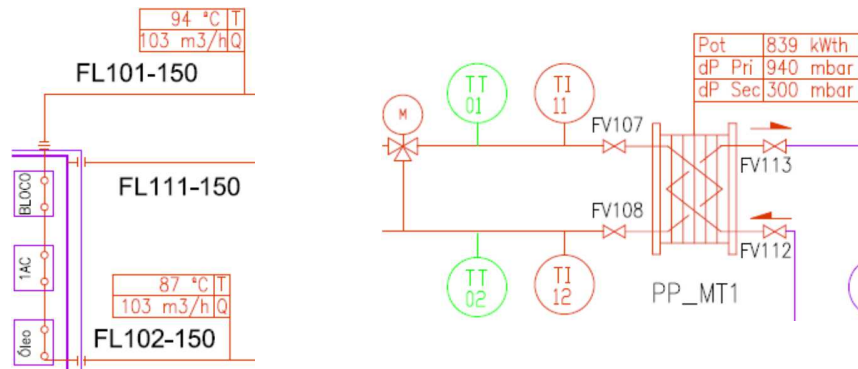


Figura 3.1 – Circuito de AT de Refrigeração do Motor – Dados do Fluxo e Permutador

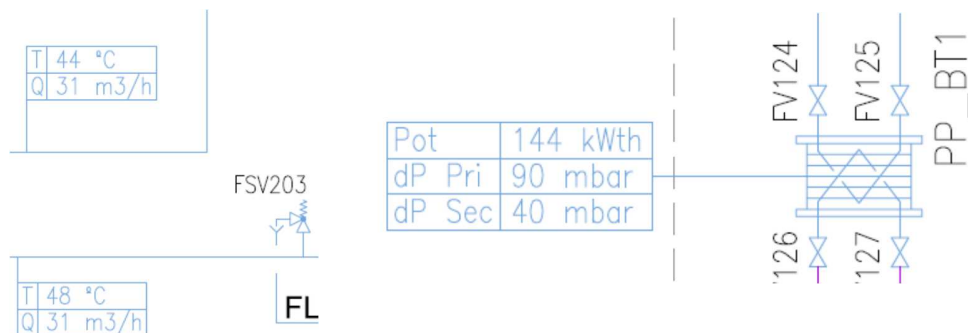


Figura 3.2 – Circuito BT de Refrigeração do Motor – Dados do Fluxo e Permutador

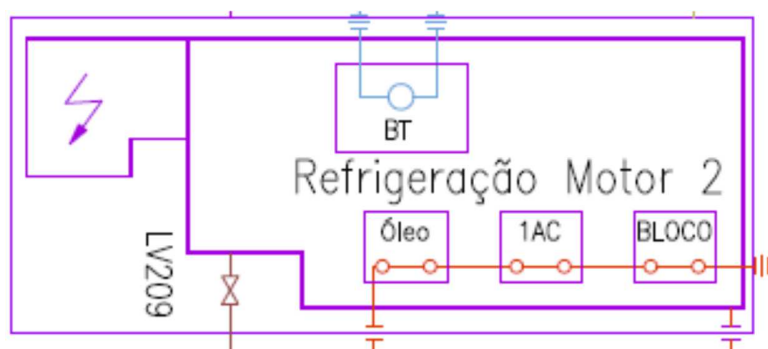


Figura 3.3 – Circuitos Simplificados de Refrigeração AT e BT do Motor

3.1 EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS

Os seguintes sistemas contêm os equipamentos que constituem a central de cogeração que permitem o seu perfeito funcionamento. Descrevem-se os diversos sistemas, ou sistemas auxiliares do motor alternativo, que permitem o funcionamento deste e o aproveitamento térmico inerente à cogeração da central. De forma resumida têm-se as seguintes condições iniciais de projecto para estes equipamentos:

3.1.1 Sistema de Combustível

Rampa de Gás	Pressão a Montante	Pressão a Jusante	PCI do Gás	NM- N° Metano do Gás	Tipo Gás
	800 mbar	150 mbar	37,91 MJ/(N)m ³	80	Gás Natural

Tabela 3.1 – Rampa de Gás de Alimentação do Grupo

3.1.2 Sistema de Lubrificação

Sistema de Lubrificação	Capacidade abast. ^{to}	Pressão de Trabalho	Caudal de Tráfego	Tipo de Óleo
Cisterna Óleo Usado	2000 litros	atmosférica	2 m ³ /h	SAE 5W30
Cisterna Óleo Novo	2000 litros	atmosférica	2 m ³ /h	SAE 5W30
Depósito Diário	250 litros	atmosférica	gravidade	SAE 5W30

Tabela 3.2 – Sistema de Lubrificação do Motor

3.1.3 Sistema de Escape

	Temperatura Nominal	Calor a 120°C Recuperação	Tipo de Accionamento
Catalisador de Oxidação	410 °C	795 kW	N.A.
Silenciador	410 °C	795 kW	N.A.
Válvula de Cortina	410 °C	-	Electromecânico
Válvula de 3 Vias	410 °C	-	Electromecânico

Tabela 3.3 – Sistema de Escape do Motor

3.1.3.1 Caldeira Recuperativa de Vapor

Considera-se a caldeira como fazendo parte do sistema de escape da cogeração. Esta caldeira aproveita os gases de escape oriundos dos motores da cogeração. É uma caldeira do tipo Gastubular de uma só passagem de disposição horizontal, com economizador sobreposto à saída, preparada para a produção de vapor saturado. Os gases percorrem todo o feixe tubular de transferência numa só passagem entre duas câmaras (entrada/saída) de gases. O

economizador é do tipo aquotubular onde utiliza a tecnologia das superfícies estendidas² por forma a otimizar a recuperação térmica, tendo em conta a temperatura da água de alimentação e as condições de produção do vapor. Condições de serviço e de projecto da caldeira são os seguintes (omitem-se os dados do economizador por não serem relevantes para o trabalho; os dados da caldeira servem como complemento ao estudo):

Caldeira	
Temperatura da água à entrada	180 °C
Temperatura dos gases à entrada	420 °C
Temperatura dos gases à saída	199 °C
Caudal de gases	16648 kg/h
Pressão de serviço	10 barg
Pressão de cálculo	12 barg
Pressão de ensaio	21,2 barg
Temperatura de cálculo	200/250 °C
Vaporização nominal	1950 kg/h
Potência térmica	1112 kW
Superfície de transferência de calor total	369,6 m ²
Volume total	8500 litros

Tabela 3.4 – Dados da Caldeira

3.1.4 Grupo Gerador – Motor Alternativo

Os dois grupos geradores são as máquinas principais da cogeração deste hospital. Estes são constituídos por alternador Caterpillar[®], modelo SRB5 e pelo motor Caterpillar[®] modelo, G3516E. Apresenta-se um quadro resumo:



Figura 3.4 – Fotografia de um Grupo Gerador CAT G3516E (fonte: Caterpillar[®])

² Superfícies Estendidas permitem a transferência de calor de forma bastante eficiente, por condução no interior de sólidos e por convecção/radiação na fronteira do sólido; exemplo: aletas.

DADOS DO MOTOR

Velocidade de Rotação do Motor	1500 rpm
Relação de Compressão	11,6:1
Sistema de Refrigeração	Alta Temp – A.T. Baixa Temp – B.T.
Número Mínimo de Metano (MN)	80
PCI Mínimo do Motor	35,6 MJ/(N)m ³
Emissões NO _x	500 mg/(N)m ³
Potência Mecânica	1656 kWm (100% carga)
Potência Eléctrica do Grupo	1600 kW _e (100% carga)

Tabela 3.5 – Dados do Motor

A refrigeração do motor é constituída por dois circuitos distintos: o circuito de alta temperatura, AT, que em série, é constituído pelo calor retirado do bloco do motor (JW – Jacket Water), pelo calor retirado no permutador do óleo do motor (OC – Oil Cooler) e pelo calor retirado do permutador de calor da 1ª etapa do sobrealimentador do motor. E ainda pelo circuito de baixa temperatura BT, onde é retirado o calor apenas da 2ª etapa do sobrealimentador do motor. Ou seja, os sobrealimentadores (ou mais comumente, turbo-compressores) têm dois permutadores ar-água que arrefecem em duas etapas a mistura ar-gás, após esta ter passado pela compressão do turbo-compressor. O motor tem então dois turbo-compressores (um por bancada), accionados pelos gases de escape (turbina).

A Caterpillar® designa as duas etapas por 1AC (1ª etapa) e 2AC (2ª etapa), mas neste trabalho poderão surgir referências respectivamente por 1AS e 2AS.

3.1.4.1 Calor Rejeitado pelo Motor

No seguinte quadro apresentam-se os valores de calor libertados pelo motor:

Balanco Térmico	100% Carga	Temperaturas no Motor
Circuito AT	839 kW (somatório)	Saída: 94°C / Entrada: 87°C
Circuito BT	144 kW	Saída: 44°C / Entrada: 48°C
Escape	795 kW (recuperável até aos 120°C) 1198 kW (recuperável até aos 25°C)	410°C
Radiação do Motor	109 kW	N.A.
PCI Fornecido ao Motor	3945 kW	Nas Condições Normais (N)

Tabela 3.6 – Balanço Térmico do Motor

3.1.4.2 Dados Operacionais do Motor

Características e requisitos adicionais para o funcionamento do motor:

DADOS DO MOTOR	100% DE CARGA
Consumo de Combustível	8,58 MJ/kWh
Ar de Combustão	4,0 (N)m ³ /kWm.h
Pressão na Saída do Sobrealimentador	412 kPaa
Temp. na Saída do Sobrealimentador	214 °C
Pressão do Colector Alimentação	385 kPaa
Temperatura do Colector de Alimentação	45°C
Caudal dos Gases de Escape do Motor	4,24 (N)m ³ /kWm.h
Caudal de Água – Circuito AT	103 m ³ /h
Caudal de Água – Circuito BT	31 m ³ /h

Tabela 3.7 – Dados Adicionais do Motor

Os caudais de água dos circuitos de refrigeração são dados de projecto desta instalação; é o caudal de água necessário para remoção de calor nos circuitos AT e BT do motor (tendo para isso sido utilizada a equação recorrente, $Q = m.C_p.\Delta T$).

3.1.4.3 Emissões do Motor

Os gases de escape têm a seguinte característica a nível de emissões, a 100% da carga:

NO _x – NO ₂ (corr. 5% O ₂)	500 mg/(N)m ³
CO (corr. 5% O ₂)	995 mg/(N)m ³
THC (corr. 5% O ₂)	3356 mg/(N)m ³
NMHC (corr. 5% O ₂)	504 mg/(N)m ³
O ₂	9,4 %
Lambda, λ	1,75 (Lean Burn)

Tabela 3.8 – Emissões do Motor

4 ANÁLISE TERMODINÂMICA E RENDIMENTOS DO MOTOR

Para a determinação da exergia e dos rendimentos energéticos e exergéticos do grupo gerador apresenta-se o diagrama simplificado do motor (e alternador), ou P&ID do motor e alternador, nos seus vários subsistemas, para a avaliação das propriedades termodinâmicas dos vários fluxos nos vários pontos e que percorrem os subsistemas (ou componentes) de todo o motor:

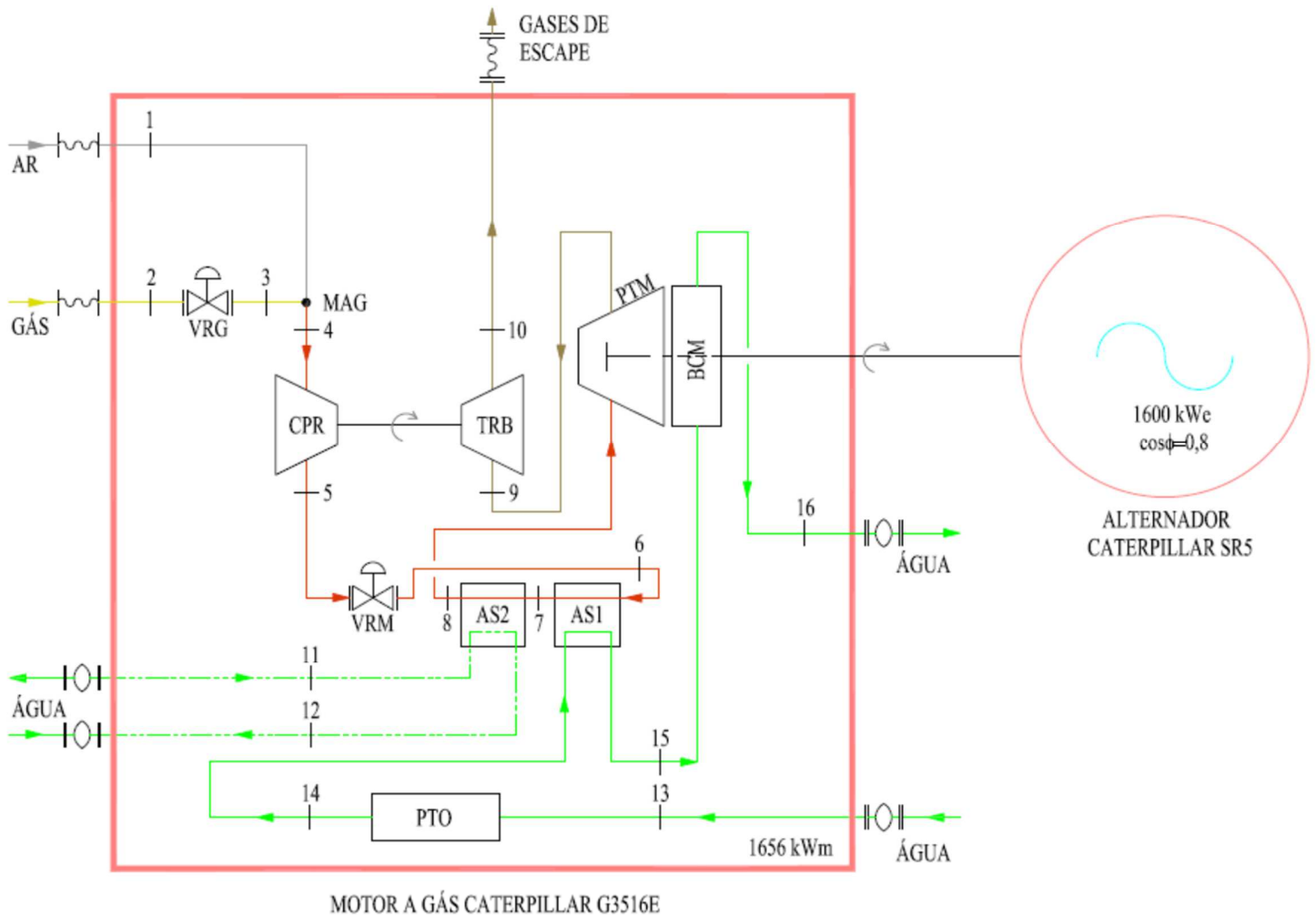


Figura 4.1 – Diagrama de fluxos do Motor

Apresentam-se nas tabelas seguintes, a legenda relativa aos componentes e aos fluxos do diagrama de princípio do sistema termodinâmico do motor (e alternador):

fluxo: água BT (sobrealimentador - 2ª etapa):	— · · · · · —
fluxo: água AT (sobrealimentador - 1ª etapa):	— — — — —
fluxo: gases de escape (fluxo gasoso):	— — — — —
fluxo: mistura ar-gás (fluxo gasoso):	— — — — —
fluxo: gás natural (fluxo gasoso):	— — — — —
fluxo: ar atmosférico (fluxo gasoso):	— — — — —

AS1: 1ª etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador
AS2: 2ª etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador
BCM: Bloco do Motor
CPR: Compressor
MAG: Mistura Ar e Gás (natural)
PTM: Produção de Trabalho no Motor
PTO: Permutor de Calor de Óleo (lubrificação do motor)
VRG: Válvula Reguladora de Gás (natural)
VRM: Válvula Reguladora da Mistura

Tabela 4.1 – Legendas do Diagrama de Princípio do Motor e Alternador

4.1 PRESSUPOSTOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA

Consideram-se os seguintes pressupostos e limitações para a condução da análise termodinâmica do grupo gerador:

1. As condições de referência são $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$ e $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (298,15 K); são as condições muitas vezes referidas como, estado morto.
2. Composição do ar atmosférica para a combustão do motor: Azoto N_2 (ou Nitrogénio) e Oxigénio O_2 (respectivamente, 78,9916% e 21,0084%).
3. O motor funciona em excesso de ar, ou seja tem um $\lambda=1,75$ (“lean burn”).
4. Os gases de escape emitidos que foram considerados para este trabalho e de acordo com a equação da combustão adoptada (nos pontos seguintes) são: água, H_2O ; Nitrogénio N_2 ; Oxigénio O_2 e Dióxido de Carbono, CO_2 . Apesar de durante o processo de combustão serem emitidas muitas espécies intermédias (e de acordo com as emissões referidas nas especificações do fabricante), OH, O, C, HC, mas de difícil quantificação, i.e., com dados insuficientes.
5. Considera-se o calor dos gases de escape de acordo com as especificações do fabricante.
6. O tipo de regime do grupo gerador é em contínuo e a 100% da carga. Os grupos funcionam em média 17 horas diárias, com paragens programadas e ajustadas às especificidades próprias da instalação nos fins de semana.
7. Os fluxos gasosos são modelados como gases ideais e mistura de gases ideais.

8. As energias e exergias potencial e cinética e seus efeitos na análise termodinâmica foram consideradas como irrelevantes, pelo que não foram considerados.
9. Pela lei de conservação de massa, a massa de entrada, ar e gás natural é igual à massa de saída dos gases de escape.
10. Alguns dados de pressão e temperatura foram recolhidos na instalação através da leitura das sondas incorporadas no motor, que são acedidas remotamente via software e protocolo de ligação específica da Caterpillar®.
11. As válvulas reguladoras de gás e da mistura, foram consideradas como isentálpicas.
12. A água utilizada para os circuitos de refrigeração do motor (AT e BT) foi considerada sem qualquer tratamento específico ou aditivo colocado.
13. Não se considerou o by-pass interno de saída de água de refrigeração AT, a designada protecção térmica do motor, por motivos de simplificação e inexistência de dados adicionais e também por não modificar o balanço termodinâmico do sistema.
14. Valores de entalpia, entropia, densidade molar e de massa molar das várias substâncias presentes nos fluxos, foram obtidos em parte via o programa EES – Engineering Equation Solver, versão de demonstração 10.094D.

4.1.1 Caracterização do Ar e do Gás Natural

No quadro seguinte indica-se a composição molar do ar de combustão, às condições T_0 e P_0 :

	Oxigénio	Nitrogénio	Total
Ar	O ₂	N ₂	Ar
Massa Molar [kg/kmol]	32	28,01	28,85
Densidade Molar [kg/m ³]	1,308	1,145	1,179
Fracção Molar (y)	0,21008	0,78992	1

Tabela 4.2 – Dados do Ar de Combustão

4.1.1.1 Caudal do Ar de Combustão

Sabendo-se que o ar de combustão de acordo com do fabricante é 4 (N)m³/kW.h, para 1656 kW mecânicos, teremos um caudal de ar de: 6624 (N)m³/h. Fazendo a correção termodinâmica para as condições de referência (temperatura em K e pressão em kPa):

$$Q_{ar(T_0, P_0)} = Q_{ar(N)} \times \frac{T_0}{T_{(N)}} \times \frac{P_{(N)}}{P_0} \quad (4.1)$$

Ter-se-á um caudal, $Q_{ar(T_o,P_o)} = 7230,260 \text{ m}^3/\text{h} = 2,008 \text{ m}^3/\text{s}$. Multiplicando o caudal $2,008 \text{ m}^3/\text{s}$ pela densidade total do ar, tem-se: $2,368 \text{ kg/s}$ de caudal em massa. Finalmente, dividindo o último valor de caudal de ar pela massa molar total do ar, ter-se-á um caudal molar do ar no valor de $\dot{n}_{ar(T_o,P_o)} = 0,0821 \text{ kmol/s}$.

Os valores totais da massa e densidade molar são obtidos pelo somatório dos produtos da fracção de cada componente pela respectiva massa ou densidade.

4.1.1.2 Caudal do Ar do Gás Natural

Os valores de gás natural foram retirados do site da REN e são referentes ao mês de Julho de 2016 – TGNL Sines. Apresentam-se os valores médios das fracções molares deste mês no seguinte quadro:

<i>Fracções Molares</i>			
<i>Metano</i>	CH ₄ =	0,928510	% mol
<i>Etano</i>	C ₂ H ₆ =	0,052610	% mol
<i>Propano</i>	C ₃ H ₈ =	0,012471	% mol
<i>Iso-Butano</i>	i-C ₄ H ₁₀ =	0,001932	% mol
<i>Normal-Butano</i>	n-C ₄ H ₁₀ =	0,003774	% mol
<i>Iso-Pentano</i>	i-C ₅ H ₁₂ =	0,000053	% mol
<i>Normal-Pentano</i>	n-C ₅ H ₁₂ =	0,000016	% mol
<i>Nitrogénio</i>	N ₂ =	0,000630	% mol

Tabela 4.3 – Fracções Molares do Gás Natural

O consumo específico de gás natural do motor é $8,58 \text{ MJ/kW.h}$, ou seja $14208,48 \text{ MJ/h}$. Do site da REN para o mesmo mês, O PCI do gás é $10,6907 \text{ kWh/m}^3(\text{N})$, ou seja $38,489 \text{ MJ/m}^3(\text{N})$. Tem-se então um consumo real de gás natural de $370,10 \text{ (N)m}^3/\text{h}$. Aplicando (4.1), o caudal de consumo do gás natural nas condições de referência é de $404,0 \text{ m}^3/\text{h} = 0,1122 \text{ m}^3/\text{s}$. A tabela 4.3 indica as massas molares e as densidades dos constituintes do gás natural:

	Metano	Etano	Propano	nButano	iButano	nPentano	iPentano	Nitrogénio	Total
Gá Natural	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₅ H ₁₂	i-C ₅ H ₁₂	N ₂	-
Massa Molar [kg/kmol]	16,04	30,07	44,1	58,12	58,12	72,15	72,15	28,01	17,38
Densidade [kg/m³]	0,6556	1,229	1,802	2,449	2,44	620,8	614,5	1,145	0,75304
Fracções Molares	0,928514	0,05261	0,012471	0,003774	0,001932	0,000016	0,000053	0,00063	1

Tabela 4.4 – Massa Molar e Densidades dos Componentes do Gás Natural

O caudal molar do gás natural determina-se de forma idêntica ao do ar de combustão. Assim ter-se-á $0,0845 \text{ kg/s}$ e por fim, $\dot{n}_{\text{Gás Natural}(T_o,P_o)} = 0,004862 \text{ kmol/s}$.

4.1.1.3 Caudal da Mistura Ar – Gás Natural

A mistura ar de combustão com o gás natural resulta num caudal expresso através da seguinte relação entre os dois fluidos:

$$y_{j4} = \frac{(y_{j1} \times \dot{n}_1) + (y_{j3} \times \dot{n}_3)}{\dot{n}_1 + \dot{n}_3} \quad (4.2)$$

onde o subscrito j é relativo ao componente do fluido e i é relativo ao fluxo. Desta forma o caudal molar, $\dot{n}_{mistura (T_o, P_o)} = 0,08692$ kmol/s, com $i = 4$ a 8.

4.1.2 Principais Variáveis no Balanço Termodinâmico

As principais variáveis conhecidas para o balanço e análise termodinâmica do sistema apresentam-se na tabela abaixo representada. O caudal molar da água foi determinado considerando que massa molar da água, é 18 g/mol, pelo que para o circuito AT: $[(103.10^6/18)/3600]/1000$, ou seja 1,59 kmol/s. Aplicando o mesmo cálculo para o circuito de refrigeração BT, ter-se-á neste circuito: 0,478 kmol/s.

Fluxo	Tipo	Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	\dot{n} [kmol/s]
1	Ar	25	101,3	0,08210
2	Gás Natural	25	101,3	0,004862
3	Gás Natural	25	101,3	0,004862
4	Mistura Ar+GN	25	101,3	0,08692
5	Mistura Ar+GN	214	310,70	0,08692
6	Mistura Ar+GN	214	310,70	0,08692
7	Mistura Ar+GN	158,25	296	0,08692
8	Mistura Ar+GN	45	284	0,08692
9	Gases de Escape	620	270	0,08692
10	Gases de Escape	410	101,3	0,08692
11	Água (BT)	44	285	0,478
12	Água (BT)	48	90	0,478
13	Água (AT)	87	250	1,590
14	Água (AT)	88	200	1,590
15	Água (AT)	91	150	1,590
16	Água (AT)	94	90	1,590

Tabela 4.5 – Principais Parâmetros para Análise do Sistema Termodinâmico

4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Pretende-se determinar as entalpias, as entropias e as exergias dos vários pontos dos fluxos do sistema considerado e de acordo com o diagrama representativo do sistema termodinâmico do motor (e alternador), de forma a serem calculados os rendimentos energéticos e exergéticos deste sistema e tendo como ponto de partida os dados fornecidos e recolhidos na instalação que estão indicados nos pontos anteriores, tais como temperaturas, pressões e caudais nos vários pontos dos fluxos deste sistema termodinâmico.

4.2.1 Entalpia e Entropia

- Entalpia e entropia nos fluxos líquidos

Os fluxos líquidos ocorrem para $i = 11$ a 16 e são relativos aos fluxos de água nos circuitos de refrigeração AT e BT do motor. Nestes escoamentos não há variação da composição do fluido e pode-se calcular a entalpia e a entropia pelas seguintes relações (Bejan et al., 1996):

$$\bar{h}(T, P) - \bar{h}(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) = \bar{h}^{\oplus}(T, P) - \bar{h}^{\oplus}(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \quad (4.3)$$

$$\bar{s}(T, P) - \bar{s}(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) = \bar{s}^{\oplus}(T, P) - \bar{s}^{\oplus}(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \quad (4.4)$$

Onde $\bar{h}(T, P)$ e $\bar{s}(T, P)$ são os valores de referência para a água de refrigeração à temperatura e pressão do escoamento. Os valores de entalpia são os de entalpia de formação e os da entropia, são da entropia absoluta.

\bar{h}^{\oplus} e \bar{s}^{\oplus} , são entalpia e entropia da água saturada à pressão P_0 e à temperatura T_0 ou seja a 25°C e a $101,3\text{ kPa}$.

Pode-se recorrer às tabelas de vapor de água para a determinação da entalpia e da entropia. Foi, no entanto, utilizado o programa EES para a obtenção destes valores.

- Entalpia e entropia nos fluxos gasosos

Os fluxos gasosos foram divididos em três tipos:

- Fluxos sem mistura (ar de combustão);
- Fluxos com mistura (mistura do ar de combustão com o gás natural);
- Fluxos dos gases de escape.

Qualquer dos fluxos, foram considerados como constituídos por gases ideais. Para os fluxos sem mistura e com mistura, i.e., sem condensação, a entalpia e a entropia obtêm-se respeitando as seguintes relações entre constituintes e fracções molares, considerando que

num gás ideal a entalpia é função apenas da temperatura e a entropia é função da temperatura e da pressão parcial no fluxo:

$$\bar{h}_i(T_i) = \sum_j y_j \times \bar{h}_j(T_i) \quad (4.5)$$

$$\bar{s}_i(T_i, P_i) = \sum_j y_j \times \bar{s}_j(T_i, P_{ji}) \quad (4.6)$$

$i = 1$ a 10 ; j é o componente da substância.

Por sua vez \bar{h}_j e \bar{s}_j , podem ser determinados de acordo com as seguintes relações:

$$\bar{h}_j(T, P) = h_f^0 + \Delta\bar{h} \quad (4.7)$$

$$\Delta\bar{h} = \bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{ref}, P_{ref}) \quad (4.8)$$

$$\bar{s}_j(T, P) = \bar{s}^0(T) - \bar{R} \times \ln \frac{P}{P_{ref}} \quad (4.9)$$

Onde se considera h_f^0 como a entalpia de formação num composto quando este é formado a partir dos seus elementos mais elementares, à $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ e $P_{ref} = 101,3 \text{ kPa}$ (iguais a T_0 e P_0); ou seja a entalpia de um elemento composto por outros a T_{ref} e P_{ref} é a entalpia de formação. Por outro lado $\Delta\bar{h}$ é a variação de entalpia entre o estado de T_{ref} e P_{ref} e o estado do fluxo. \bar{s}_j é a entropia absoluta à temperatura do fluxo e à pressão de referência.

Por outro lado, há ainda a considerar a determinação da entalpia e da entropia às condições de referência, T_0 e P_0 , ou estado morto, que por coincidência são iguais às condições de referência para (4.7). A pressão parcial P_{ji} é determinada em (4.12).

$$\bar{h}_i^0(T_0) = \sum_j y_{ji} \times \bar{h}_j(T_0) \quad (4.10)$$

$$\bar{s}_i^0(T_0, P_0) = \sum_j y_{ji} \times \bar{s}_j(T_0, P_{0ji}) \quad (4.11)$$

$$P_{0ji} = P_0 \times y_{ji} \quad (4.12)$$

para $i = 4$ a 10 ; j é o componente da substância.

4.2.1.1 Entalpia e Entropia com Condensação

Os fluxos gasosos dos gases de escape apresentam condensação do vapor de água no seu seio (para pormenores ver o ponto 4.2.4).

- Entalpia

As fracções molares são modificadas devido à presença de uma fracção líquida devido à condensação:

$$\bar{h}_i^0(T_0) = \sum_j y_{ji} \times \bar{h}_j(T_0) \quad (4.13)$$

para $i = 9$ e 10 ; $j = \text{CO}_2 / \text{O}_2 / \text{N}_2 / \text{H}_2\text{O (g)} / \text{H}_2\text{O (l)}$.

- Entropia

Da mesma forma para i e j :

$$\bar{s}_i^0(T_0, P_0) = \sum_j y_{ji} \times \bar{s}_j(T_0, P_{0ji}) + y_{\text{H}_2\text{O},i} \times \bar{s}_{\text{H}_2\text{O}(l)}(T_0, P_0) \quad (4.14)$$

A pressão parcial dos componentes do fluxo dos gases é:

$$P_{0ji} = y_{ji}^* \times P_0 \quad (4.15)$$

sendo que a nova fracção y_{ji}^* é apresentado no ponto 4.2.4.

4.2.2 Exergia Física e Exergia Química

Como já foi referido, as exergias cinética e potencial não são consideradas, pelo que se consideram apenas as exergias física e química. De uma forma geral teremos a exergia molar \bar{x}_i , como a soma das duas exergias:

$$\bar{x}_i = \bar{x}_i^f + \bar{x}_i^{ch} \quad (4.16)$$

A exergia física é expressa da seguinte forma:

$$\bar{x}_i^f = (\bar{h}_i - \bar{h}_i^0) - T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_i^0) \quad (4.17)$$

- Exergia para os fluxos líquidos, $i = 11$ a 16 .

Para os fluxos líquidos (4.14) é válida. A exergia molar química será neste caso:

$$\bar{x}_i^{ch} = \bar{x}_{\text{H}_2\text{O}(l)}^{ch} \quad (4.18)$$

A exergia da água líquida pode-se encontrar nas tabelas de Szargut (anexos).

- Exergia nos fluxos gasosos

A exergia molar física é dada também por (4.14). Para a exergia molar química, tem de se considerar os fluxos com e sem condensação à temperatura de referência. Para $i = 4$ a 8, não ocorre condensação (e $j =$ componentes das substâncias):

$$\bar{x}_i^{ch} = \sum_j y_{ji} \times \bar{x}_j^{ch} + T_0 \times \bar{R} \times \sum_j y_{ji} \times \ln(y_{ji}) \quad (4.19)$$

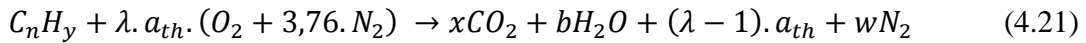
Já para os fluxos onde ocorrem condensações devido à presença de vapor de água, fluxo dos gases de escape, $i = 9$ a 10, a exergia molar química é dada pela seguinte relação:

$$\bar{x}_i^{ch} = y_{gasosa} \left[\sum_j y_{ji}^* \times \bar{x}_j^{ch} + T_0 \times \bar{R} \times \sum_j y_{ji}^* \times \ln(y_{ji}^*) \right] + y_{liquida} \bar{x}_{H_2O}^{ch(l)} \quad (4.20)$$

Das relações expostas há que considerar que a \bar{x}_j^{ch} é a exergia química molar nas condições T_0 e P_0 .

4.2.3 Combustão

Considerando o fenómeno de combustão que ocorre no motor, o modelo da reacção de combustão considerada é o seguinte (Holman, 1988):



Onde λ é a razão entre o ar fornecido e a_{th} , sendo que a_{th} é a relação estiquiométrica ar-combustível (desconhecida). Para resolver a equação da combustão, consideram-se as seguintes relações:

- Para o Carbono, temos que, $x = n$ (4.22)

- Para o Hidrogénio, temos que, $b = 2y$ (4.23)

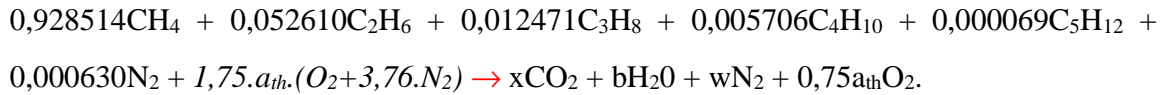
- Para o Oxigénio e considerando a_{th} :

$$\lambda \cdot a_{th} = x + \frac{y}{4} + (\lambda - 1) \cdot a_{th} \quad (4.24)$$

- Para o Nitrogénio:

$$w = \sum_j \frac{N_2}{2} \quad (4.25)$$

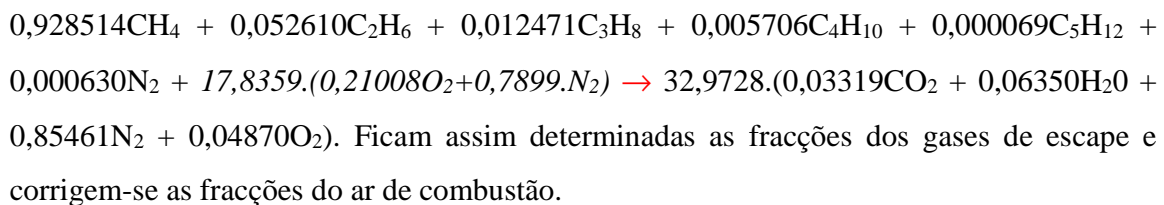
Desta forma, resolve-se a equação da combustão. Foi ainda considerado em relação ao Butano (C₄H₁₀) e ao Pentano (C₅H₁₂), constituídos por fracções normais e iso (isómeros), a soma das fracções normal e iso, pelo que surgem na equação apenas como Butano e Pentano:



Resolvendo as equações da combustão, obtêm-se os seguintes resultados [mol]:

$$x \text{ (C)} = 1,09432 \quad b \text{ (H)} = 2,09369 \quad a_{th} \text{ (O)} = 2,14117 \quad w \text{ (N)} = 14,0895$$

Obtidos os resultados, reescreve-se a equação com as em fracções molares da seguinte forma:



4.2.4 Condensação – Gases de Escape

Ao se comparar com o estado de referência, T₀, P₀, as condições dos fluxos dos gases de escape contendo vapor de água leva a que ocorra condensação de vapor no seio do fluxo, pelo que teremos a presença de água, de acordo com a seguinte relação, em termos de moles:

$$n_{H_2O} = n_{H_2O(l)} + n_{H_2O(g)} \quad (4.26)$$

assim para T₀ = 25 °C, o vapor de água condensa-se à pressão de saturação, P_{sat(25°C)} = 3,169 kPa. A pressão de saturação está de acordo com a relação:

$$P_{H_2O,i} = y_{H_2O,i} \times P_0 \quad (4.27)$$

O valor obtido compara-se ao valor de saturação para T₀ e verifica se P_{H₂O,i} > P_{sat(25°C)}. Se se verificar condensação, a composição das fracções é alterada. Assim os componentes dos gases de escape terão elementos gasosos e líquidos na composição da água, a 25°C:

$$n_{P,25^\circ C} = n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O(l)} + n_{H_2O(g)} \quad (4.28)$$

Tendo em conta a nova composição molar dos constituintes dos gases de escape, considera-se que n_{P,25°C} = 1 mol, pelo que as quantidades molares terão valor numérico igual às fracções molares:

$$y_j = n_j, \text{ para } j = \text{CO}_2 / \text{O}_2 / \text{N}_2 / \text{H}_2\text{O (g)} / \text{H}_2\text{O (l)} \quad (4.29)$$

A nova composição molar será y_j^* . Calcula-se y_j^* da seguinte forma:

$$y_j^* = \frac{n_j}{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O(g)}} \quad (4.30)$$

com $j = CO_2 / O_2 / N_2 / H_2O (g)$. Então a fração líquida e gasosa a 25°C, é:

$$y_{líquida} = \frac{n_{H_2O(l)}}{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O(g)} + n_{H_2O(l)}} \quad (4.31)$$

$$y_{gasosa} = \frac{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O(g)}}{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O(g)} + n_{H_2O(l)}} \quad (4.32)$$

Deve-se ainda que a pressão parcial de vapor de água a P_0 , é:

$$P_{H_2O} = y_{H_2O}^* \times P_0 \quad (4.33)$$

4.2.5 Taxas

Consideram-se as seguintes taxas relativas aos fluxos do sistema termodinâmico, em relação ao fluxo de energia, entropia e de exergia:

$$\dot{E}_i = \dot{n}_i \times \bar{h}_i \quad (4.34)$$

$$\dot{S}_i = \dot{n}_i \times \bar{s}_i \quad (4.35)$$

$$\dot{X}_i = \dot{n}_i \times \bar{x}_i \quad (4.36)$$

4.3 BALANÇO DOS COMPONENTES NO SISTEMA TERMODINÂMICO

Este balanço termodinâmico, nos vários fluxos e componentes, incide sobre a massa, a energia, a entropia e a exergia. Para tal estabelecem-se os volumes de controlo para cada componente (ou subsistema) do motor e alternador, e avaliam-se as entradas e as saídas dos fluxos pelos volumes de controlo.

4.3.1 Válvula Reguladora de Gás – VRG

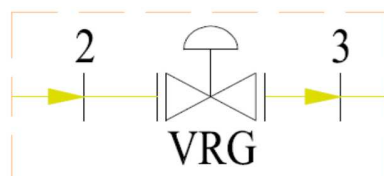


Figura 4.2 – Volume Controlo – VRG

- Balanço de massa

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_3 \quad (4.37)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_3 \quad (4.38)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(VRG)} + \dot{S}_2 = \dot{S}_3 \quad (4.39)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_2 - \dot{X}_{D(VRG)} = \dot{X}_3 \quad (4.40)$$

O fabricante do grupo não disponibiliza informação sobre as variações de parâmetros a jusante desta válvula.

4.3.2 Mistura Ar-Combustível – MAG

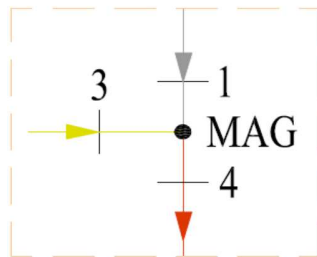


Figura 4.3 – Volume Controlo - MAG

- Balanço de massa

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_3 = \dot{n}_4 \quad (4.41)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_3 = \dot{E}_4 \quad (4.42)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(MAG)} + \dot{S}_1 + \dot{S}_3 = \dot{S}_4 \quad (4.43)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_1 + \dot{X}_3 - \dot{X}_{D(MAG)} = \dot{X}_4 \quad (4.44)$$

4.3.3 Válvula Reguladora da Mistura – VRM



Figura 4.4 – Volume Controlo - VRM

- Balanço de massa

$$\dot{n}_5 = \dot{n}_6 \quad (4.45)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_5 = \dot{E}_6 \quad (4.46)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(VRM)} + \dot{S}_5 = \dot{S}_6 \quad (4.47)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_5 - \dot{X}_{D(VRM)} = \dot{X}_6 \quad (4.48)$$

O fabricante do grupo não disponibiliza informação sobre as variações de parâmetros a jusante desta válvula.

4.3.4 Turbina e Compressor

Estabelecem-se três análises: - Turbo-Compressor; - Compressor; - Turbina.

- Turbo-Compressor

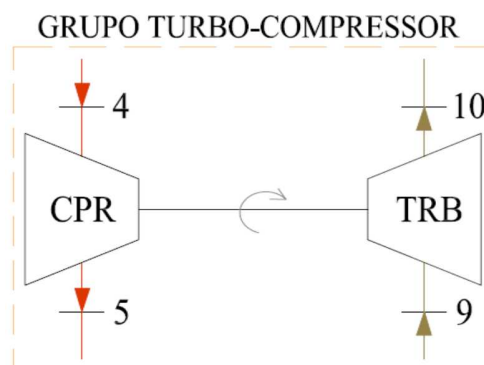


Figura 4.5 – Volume Controlo – Turbo-Compressor

- Balanço de massa

$$\dot{n}_4 + \dot{n}_9 = \dot{n}_5 + \dot{n}_{10} \quad (4.49)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_4 + \dot{E}_9 = \dot{E}_5 + \dot{E}_{10} + \dot{Q}_{TC} \quad (4.50)$$

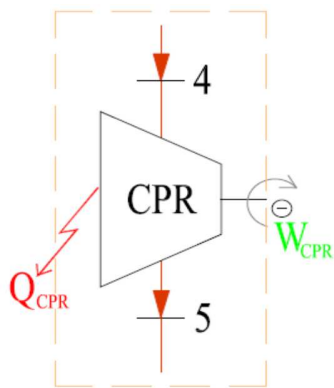
- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(TC)} + \dot{S}_4 + \dot{S}_9 = \dot{S}_5 + \dot{S}_{10} + \frac{\dot{Q}_{TC}}{T_0} \quad (4.51)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_4 + \dot{X}_9 - \dot{X}_{D(TC)} = \dot{X}_5 + \dot{X}_{10} \quad (4.52)$$

- Compressor



Neste componente ocorre a compressão da mistura ar-combustível. O compressor recebe trabalho da turbina e é transferido calor para a mistura devido à sua compressão.

Figura 4.6 – Volume Controlado – Compressor

- Balanço de massa

$$\dot{n}_4 = \dot{n}_5 \quad (4.53)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_4 + \dot{W}_{CPR} = \dot{E}_5 + \dot{Q}_{CPR} \quad (4.54)$$

$$\dot{W}_{CPR} = \dot{W}_{TBR} \quad (4.55)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(CPR)} + \dot{S}_4 = \dot{S}_5 + \frac{\dot{Q}_{CPR}}{T_0} \quad (4.56)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_4 + \dot{W}_{CPR} - \dot{X}_{D(CPR)} = \dot{X}_5 \quad (4.57)$$

- Turbina

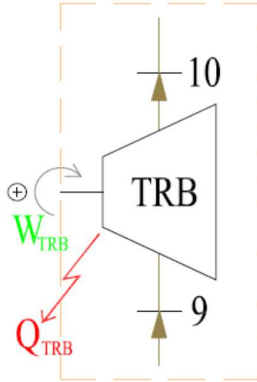


Figura 4.7 – Volume Controlo – Turbina

- Balanço de massa

$$\dot{n}_9 = \dot{n}_{10} \quad (4.58)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_9 = \dot{E}_{10} + \dot{Q}_{TBR} + \dot{W}_{TBR} + \dot{Q}_{GEP} \quad (4.59)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(TBR)} + \dot{S}_9 = \dot{S}_{10} + \frac{\dot{Q}_{TBR}}{T_0} \quad (4.60)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_9 - \dot{X}_{D(CPR)} = \dot{X}_{10} + \dot{W}_{TBR} \quad (4.61)$$

4.3.5 Arrefecedores dos Sobrealimentadores

ARREFECEDORES DA SOBREALIMENTAÇÃO (2 ETAPAS)

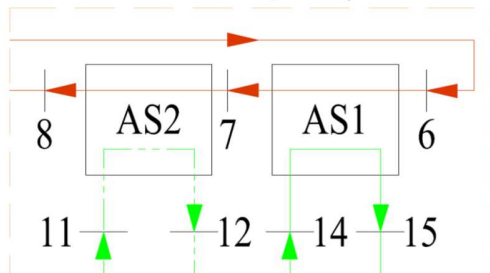
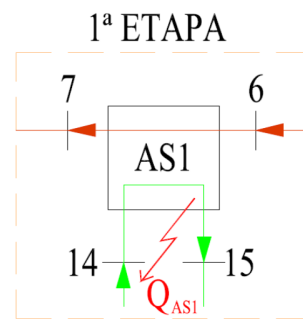


Figura 4.8 – Volume Controlo – AS1+AS2



Calor permutado p/ líquido refrigerante
Figura 4.9 – Volume Controlo – AS1

- 1ª Etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador

A mistura, quente pela compressão, entra no 1º estágio do permutador interno do motor que arrefece a mistura até a temperatura adequada para entrar no 2º estágio (AS2) e de onde sairá para o colector de admissão e finalmente para os cilindros do motor.

- Balanço de massa

$$\dot{n}_{14} = \dot{n}_{15} \quad (4.62)$$

$$\dot{n}_6 = \dot{n}_7 = \dot{n}_8 \quad (4.63)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_{14} + \dot{E}_6 = \dot{E}_{15} + \dot{E}_7 + \dot{Q}_{AS1} \quad (4.64)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(AS1)} + \dot{S}_{14} + \dot{S}_6 = \dot{S}_{15} + \dot{S}_7 + \frac{\dot{Q}_{AS1}}{T_0} \quad (4.65)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_{14} + \dot{X}_6 - \dot{X}_{D(AS1)} = \dot{X}_{15} + \dot{X}_7 \quad (4.66)$$

- 2ª Etapa do Arrefecedor do Sobrealimentador

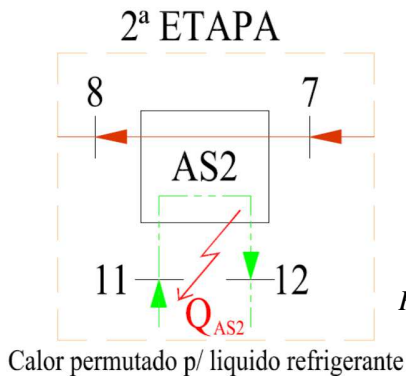


Figura 4.10 – Volume Controlo – AS2

- Balanço de massa

$$\dot{n}_{11} = \dot{n}_{12} \quad (4.67)$$

$$\dot{n}_6 = \dot{n}_7 = \dot{n}_8 \quad (4.63)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_{11} + \dot{E}_7 = \dot{E}_{12} + \dot{E}_8 + \dot{Q}_{AS2} \quad (4.68)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(AS2)} + \dot{S}_{11} + \dot{S}_7 = \dot{S}_{12} + \dot{S}_8 + \frac{\dot{Q}_{AS2}}{T_0} \quad (4.69)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_{11} + \dot{X}_7 - \dot{X}_{D(AS2)} = \dot{X}_{12} + \dot{X}_8 \quad (4.70)$$

- Balanço Geral dos Arrefecedores do Sobrealimentador

De acordo com a figura 4.8:

- Balanço de Massa

$$\dot{n}_6 + \dot{n}_{11} + \dot{n}_{14} = \dot{n}_8 + \dot{n}_{12} + \dot{n}_{15} \quad (4.71)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_6 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{14} = \dot{E}_8 + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{15} + \dot{Q}_{AS2} \quad (4.72)$$

$$\dot{Q}_{TOTAL(AS)} = \dot{Q}_{AS1} + \dot{Q}_{AS2} \quad (4.73)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(TOTAL AS)} + \dot{S}_6 + \dot{S}_{11} + \dot{S}_{14} = \dot{S}_8 + \dot{S}_{12} + \dot{S}_{15} + \frac{\dot{Q}_{TOTAL AS}}{T_0} \quad (4.74)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_6 + \dot{X}_{11} + \dot{X}_{14} - \dot{X}_{D(TOTAL AS)} = \dot{X}_8 + \dot{X}_{12} + \dot{X}_{15} \quad (4.75)$$

4.3.6 Conjunto Produtor de Trabalho do Motor

Considera-se como conjunto produtor de trabalho do motor, o conjunto de subsistemas onde é realizada a combustão e conseqüente produção de trabalho ao veio do motor, que leva à libertação de calor por irradiação para a atmosfera e para a água de refrigeração do motor (BCM), considera-se ainda a refrigeração do óleo como fazendo parte deste conjunto (PTO - removendo o calor do óleo de lubrificação do motor). Assim reagrupando os subsistemas do diagrama principal do motor ter-se-á:

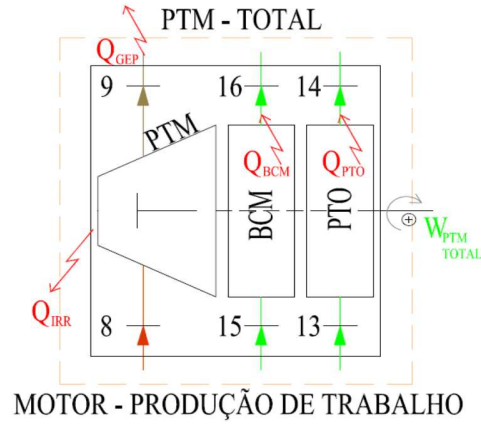


Figura 4.11 – Volume Controle – Produção de Trabalho

- Balanço de massa

$$\dot{n}_{13} = \dot{n}_{14} = \dot{n}_{15} = \dot{n}_{16} \quad (4.76)$$

$$\dot{n}_8 + \dot{n}_{13} = \dot{n}_9 + \dot{n}_{16} \quad (4.77)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_8 + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{15} = \dot{E}_9 + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{IRR} + \dot{Q}_{AS1} + \dot{Q}_{BCM} + \dot{Q}_{PTO} + \dot{Q}_{GEP} \quad (4.78)$$

$$\dot{E}_{13} = \dot{E}_{14} + \dot{Q}_{PTO} \quad (4.79)$$

$$\dot{E}_{15} = \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{PTO} + \dot{Q}_{AS1} + \dot{Q}_{BCM} \quad (4.80)$$

$$\dot{E}_8 = \dot{E}_9 + \dot{Q}_{GEP} \quad (4.81)$$

- Balanço de Entropia

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ger(PTM-TOTAL)} + \dot{S}_8 + \dot{S}_{13} + \dot{S}_{15} \\ = \dot{S}_9 + \dot{S}_{14} + \dot{S}_{16} + \frac{\dot{Q}_{IRR}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{AS1}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{BCM}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{PTO}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{GEP}}{T_0} \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\dot{S}_{ger(PTO)} + \dot{S}_{13} = \dot{S}_{14} + \frac{\dot{Q}_{PTO}}{T_0} \quad (4.83)$$

$$\dot{S}_{ger(BCM)} + \dot{S}_{15} = \dot{S}_{16} + \frac{\dot{Q}_{PTO}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{AS1}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{BCM}}{T_0} \quad (4.84)$$

$$\dot{S}_{ger(PTM)} + \dot{S}_8 = \dot{S}_9 + \frac{\dot{Q}_{IRR}}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{GEP}}{T_0} \quad (4.85)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_8 + \dot{X}_{13} + \dot{X}_{15} - \dot{X}_{D(PTM)} = \dot{X}_9 + \dot{X}_{14} + \dot{X}_{16} + \dot{W}_{PTM} \quad (4.86)$$

$$\dot{X}_{13} - \dot{X}_{D(PTO)} = \dot{X}_{14} \quad (4.87)$$

$$\dot{X}_{15} - \dot{X}_{D(BCM)} = \dot{X}_{16} \quad (4.88)$$

$$\dot{X}_8 - \dot{X}_{D(PTM)} = \dot{X}_9 + \dot{W}_{PTM} \quad (4.89)$$

4.3.7 Alternador

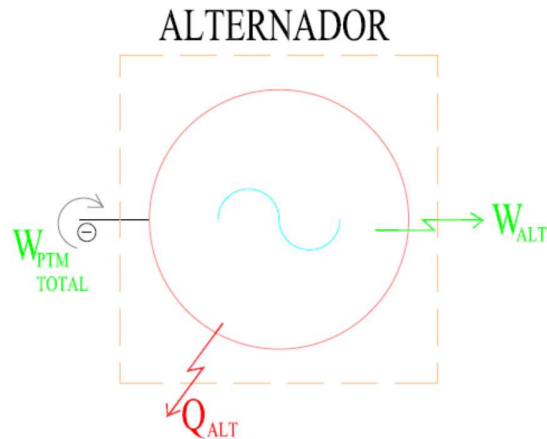


Figura 4.12 – Volume Controle – Alternador

O alternador do grupo gerador recebe trabalho mecânico do motor e transforma-o em trabalho eléctrico, sob a forma de tensão, corrente e frequência especificadas.

- Balanço de energia

$$\dot{W}_{PTM} = \dot{W}_{ALT} + \dot{Q}_{ALT} \quad (4.90)$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(TOTAL ALT)} = \frac{\dot{Q}_{ALT}}{T_0} \quad (4.91)$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{W}_{PTM} - \dot{X}_{D(TOTAL ALT)} = \dot{W}_{ALT} \quad (4.92)$$

4.3.8 Sistema Global

Resta por fim analisar globalmente o sistema termodinâmico, nas suas transferências de massa, energia, calor e trabalho, pelo volume de controlo do grupo gerador (sistema global).

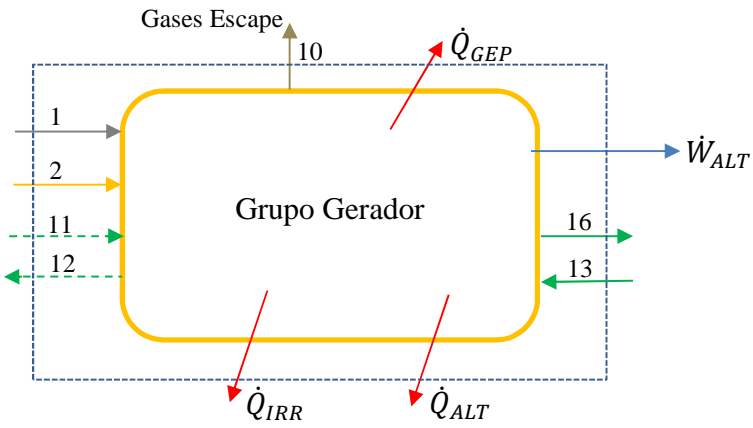


Figura 4.13 – Volume Controle – Sistema Global

- Balanço de Massa

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_2 = \dot{n}_{10} \quad (4.93)$$

$$\dot{n}_{11} = \dot{n}_{12} \quad (4.94)$$

$$\dot{n}_{13} = \dot{n}_{16} \quad (4.95)$$

- Balanço de energia

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} \quad (4.96)$$

$$= \dot{E}_{10} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{IRR} + \dot{Q}_{ALT} + \dot{W}_{ALT} + (\dot{Q}_{GEP} - \dot{Q}_{TBR})$$

- Balanço de Entropia

$$\dot{S}_{ger(GLOBAL)} + \dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_{11} + \dot{S}_{12} \quad (4.97)$$

$$= \dot{S}_{10} + \dot{S}_{13} + \dot{S}_{16} + \frac{\dot{Q}_{IRR}}{T_0} + \frac{(\dot{Q}_{GEP} - \dot{Q}_{TBR})}{T_0} + \frac{\dot{Q}_{ALT}}{T_0}$$

- Balanço de Exergia

$$\dot{X}_1 + \dot{X}_2 + \dot{X}_{11} + \dot{X}_{12} - \dot{X}_{D(GLOBAL)} = \dot{X}_{10} + \dot{X}_{13} + \dot{X}_{16} + \dot{W}_{ALT} \quad (4.98)$$

4.4 CÁLCULOS AUXILIARES

Apresentam-se alguns cálculos intermédios que deram origem a tabelas e valores intermédios dos fluxos.

- **Fracções nos Vários Fluxos**

Apresenta-se o quadro com as vários fracções dos componentes das substâncias em cada fluxo, para cálculos futuros:

Componente	FLUXOS				Fracções, moles
	1	2 e 3	4 a 8	9 e 10	
Ar	-	-	-	-	
CH ₄	-	0,928514	0,05191273	-	
C ₂ H ₆	-	0,05261	0,00294140	-	
C ₃ H ₈	-	0,012471	0,00069725	-	
n-C ₄ H ₁₀	-	0,003774	0,00021100	-	
i-C ₄ H ₁₀	-	0,001932	0,00010802	-	
n-C ₅ H ₁₂	-	0,000016	0,00000089	-	
i-C ₅ H ₁₂	-	0,000053	0,00000296	-	
H ₂ O	-	-	-	0,06349740	
O ₂	0,210084	-	0,19833831	0,0487029	
N ₂	0,789916	0,000630	0,74578743	0,85461127	
CO ₂	-	-	-	0,0331885	

Figura 4.6 – Fracções dos Componentes das Substâncias por Fluxo

- **Determinação da Entalpia e da Entropia nos Fluxos Líquidos**

Pela utilização das equações (4.3) e (4.4), determinam-se a entalpia e a entropia. A título de exemplo determinam-se as duas propriedades num fluxo líquido. Para o fluxo no ponto 13 que é do circuito de AT, a água entra no motor após a água ter sido arrefecida pelo permutador de calor ou pelo ou aero-refrigerador. Para a entalpia, tem-se o seguinte cálculo:

$$\bar{h}_{13}(T_{13}, P_{13}) - \bar{h}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) = \bar{h}_{13}^{\oplus}(T_{13}, P_{13}) - \bar{h}^{\oplus}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}).$$

No ponto 13, T = 87°C e P = 250 kPa.

$$\bar{h}_{13}(T_{13}, P_{13}) = \bar{h}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) + \bar{h}_{13}^{\oplus}(T_{80^{\circ}\text{C}}, P_{250\text{kPa}}) - \bar{h}^{\oplus}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \Leftrightarrow$$

$$\bar{h}_{13}(T_{13}, P_{13}) = -285813 + 6566 - 1890 \Leftrightarrow$$

$$\bar{h}_{13}(T_{13}, P_{13}) = -281137 \text{ kJ/kmol}$$

Todos os valores foram encontrados utilizando as funções termodinâmicas do programa EES. Para a entropia, tem-se o seguinte cálculo:

$$\bar{s}(T, P) - \bar{s}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) = \bar{s}^{\oplus}(T, P) - \bar{s}^{\oplus}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \Leftrightarrow$$

$$\bar{s}(T_{13}, P_{13}) - \bar{s}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) = \bar{s}^{\oplus}(T_{13}, P_{13}) - \bar{s}^{\oplus}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \Leftrightarrow$$

$$\bar{s}(T_{13}, P_{13}) = \bar{s}^{\oplus}(T_{87^{\circ}\text{C}}, P_{250\text{kPa}}) - \bar{s}^{\oplus}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) + \bar{s}(25^{\circ}\text{C}, 101,3\text{kPa}) \Leftrightarrow$$

$$\bar{s}(T_{13}, P_{13}) = 20,853 - 6,619 + 69,948 \Leftrightarrow$$

$$\bar{s}(T_{13}, P_{13}) = 20,853 - 6,619 + 69,948 \Leftrightarrow$$

$$\bar{s}(T_{13}, P_{13}) = 84,182 \text{ kJ/kmol.K.}$$

Apresenta-se a entalpia e entropia molar nos fluxos líquidos:

Fluxo	Ponto	\bar{h} [kJ/kmol]	\bar{s} [kJ/kmol.K]
Água BT	11	-284380	74,593
Água BT	12	-284081	75,539
Água AT	13	-281137	84,182
Água AT	14	-281062	84,939
Água AT	15	-280836	85,020
Água AT	16	-280609	85,653

Figura 4.7 – Entalpia e Entropia para os Fluxos Líquidos

- **Determinação da Entalpia e da Entropia nos Fluxos Gasosos**

Para os fluxos gasosos sem condensação, ou seja, para $i = 1$ a 8 , a determinação da entalpia e da entropia é feita recorrendo às expressões (4.5) a (4.9) e de (4.10) a (4.12), bem como às tabelas termodinâmicas dos gases perfeitos. Determina-se a entalpia dos vários componentes das substâncias nos vários pontos dos fluxos. Através do programa EES, tendo em consideração que os componentes n-Butano, i-Butano, n-Pentano e i-Pentano foram tratados como fluidos reais, sendo que a entalpia também varia em função da pressão de determinado ponto do sistema:

Pto.	Temp [°C]	Entalpia Molar [kJ/kmol] dos Componentes das Substâncias Gasosas										
		O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	nC ₄ H ₁₀	iC ₄ H ₁₀	nC ₅ H ₁₂	iC ₅ H ₁₂
1	25	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
2	25	0	-	0	-	-74595	-83846	-104674	36439	34811	-150,3	-25256
3	25	0	-	0	-	-74595	-83846	-104674	36439	34811	-150,3	-25256
4	25	0	-	0	-	-74595	-83846	-104674	36439	34811	-150,3	-25256
5	214	5703	-	5529	-	-66881	-71617	-87154	59627	57883	54516	28063
6	214	5703	-	5529	-	-66881	-71617	-87154	59627	57883	54516	28063
7	158,25	3982	-	3886	-	-69362	-75682	-93060	51801	50053	44893	18406
8	45	586,5	-	581,4	-	-73868	-82763	-103169	38082	36477	3270	-21903
9	620	19019	-365802	18014	-220154	-	-	-	-	-	-	-
10	410	11979	-376537	11432	-228269	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4.8 – Entalpia Molar para os Fluxos Gasosos

De acordo com o exposto por (4.6), determinam-se as pressões parciais em cada ponto dos fluxos de cada componente das substâncias. Apresentam-se os respectivos valores nas tabelas seguintes:

Pressões Parciais nos Fluxos [kPa]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	nC ₄ H ₁₀	iC ₄ H ₁₀	nC ₅ H ₁₂	iC ₅ H ₁₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO ₂	Pto.	Fluxos	kPa
-	-	-	-	-	-	-	-	21,282	80,018	-	1	Ar	101,3
94,0585	5,329	1,263	0,382	0,1957	0,00160	0,0054	-	-	0,0638	-	2	GN	101,3
94,0585	5,329	1,263	0,382	0,1957	0,00160	0,0054	-	-	0,0638	-	3	GN	101,3
5.2588	0,2980	0,070 6	0,0214	0,0109	0,00009	0,0003	-	20,092	75,548	-	4	Ar+GN	101,3
16,1293	0,9149	0,217 0	0,0656	0,0336	0,00028	0,0009	-	61,624	231,716	-	5	Ar+GN	310,70
16,1293	0,9149	0,217 0	0,0656	0,0336	0,00028	0,0009	-	61,624	231,716	-	6	Ar+GN	310,70
15,3662	0,8710	0,206 4	0,0625	0,0320	0,00026	0,0008 8	-	58,708	220,753	-	7	Ar+GN	296
14,7432	0,8354	0,198 0	0,0600	0,0307	0,00025	0,0008 4	-	56,323	211,804	-	8	Ar+GN	284
-	-	-	-	-	-	-	17,144	13,150	230,745	8,961	9	G. Escape	270
-	-	-	-	-	-	-	6,432	4,934	86,572	3,362	10	G. Escape	101,3

Figura 4.9 – Pressões Parciais dos Componentes das Substâncias

Segue-se a determinação da entropia molar, uma vez determinadas as pressões parciais nos vários pontos:

Pto.	Temp [°C]	Entropia Molar [kJ/kmol.K] dos Componentes das Substâncias Gasosas										
		O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	nC ₄ H ₁₀	iC ₄ H ₁₀	nC ₅ H ₁₂	iC ₅ H ₁₂
1	25	218	-	193,5	-	-	-	-	-	-	-	-
2	25	-	-	252,8	-	186,9	253,6	306,6	195,7	198,5	177,6	43,41
3	25	-	-	252,8	-	186,9	253,6	306,6	195,7	198,5	177,6	43,41
4	25	218,5	-	193,9	-	210,8	277,6	330,6	219,7	222,6	201,5	67,44
5	214	223,9	-	199,0	-	221,4	299,5	366,0	269,7	272,2	264,5	130,8
6	214	223,9	-	199,0	-	221,4	299,5	366,0	269,7	272,2	264,5	130,8
7	158,25	220,6	-	195,8	-	216,4	291,1	353,6	253,1	255,6	244,4	110,2
8	45	211,8	-	187,2	-	204,7	272,5	327,0	217,7	220,4	201,0	66,82
9	620	256,6	283,3	217,6	242,8	-	-	-	-	-	-	-
10	410	255,7	277,8	217,3	240,6	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4.10 – Entropia Molar para os Fluxos Gasosos

Os valores de entalpia e entropia determinados através do programa EES, respeitando a mesma exceção para os componentes normais e dos isômeros do Butano e do Pentano, apresentam-se na tabela 4.11:

Entalpia e Entropia Molares por Fluxo		
Fluxos em i	\bar{h} [kJ/kmol]	\bar{s} [kJ/kmol.K]
1	0	198,647
2	-74775,6	191,991
3	-74775,6	191,991
4	-4180,66	200,006
5	1530,15	205,536
6	1530,15	205,536
7	-183,923	202,197
8	-3588,22	193,346
9	-9798,34	223,280
10	-16637,9	222,658
11	-284380	74,593
12	-284081	75,539
13	-281137	84,182
14	-281062	84,939
15	-280836	85,020
16	-280609	85,653

Figura 4.11 – Tabela Resumo da Entalpia e Entropia Molar por Fluxo Gasoso

- **Determinação da Exergia**

Para determinar a exergia física há que recorrer às equações (4.10) a (4.12), de forma a ser possível determinar a exergia física por (4.17), é necessário determinar a entalpia e a entropia molares de referência.

A entalpia molar de referência, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, para os vários componentes apresenta-se na tabela seguinte, valores encontrados via software EES:

Entalpia Molar \bar{h}_i^0 [kJ/kmol]	
Componente	Fluxo $i = 1$ a 10
O₂	0
N₂	0
CO₂	-393486
H₂O (g)	-241811
H₂O (l)	-285813
CH₄	-74595
C₂H₆	-83846
C₃H₈	-104674
n-C₄H₁₀	36439
i-C₄H₁₀	34811
n-C₅H₁₂	-150,3
i-C₅H₁₂	-25256

Figura 4.12 – Entalpia Molar a Condições de Referência

Para a entropia molar de referência (4.11), $T_0 = 25^\circ\text{C}$ à pressão parcial do componente (4.12), para os vários componentes, apresentam-se na tabela seguinte onde os valores foram encontrados com o software EES. Primeiramente, aplicando (4.12), teremos as pressões parciais:

FLUXOS				
	1	2 e 3	4 a 8	9 e 10
Componente	Ar	Gás Natural	Mistura	G. Escape
CH ₄	-	94,0585	5,2588	-
C ₂ H ₆	-	5,32939	0,2980	-
C ₃ H ₈	-	1,26331	0,0706	-
n-C ₄ H ₁₀	-	0,382306	0,0214	-
i-C ₄ H ₁₀	-	0,195712	0,0109	-
n-C ₅ H ₁₂	-	0,001621	0,00009	-
i-C ₅ H ₁₂	-	0,005369	0,00030	-
H ₂ O	-	-	-	6,4323
O ₂	21,2815	-	20,092	4,9336
N ₂	80,0185	0,063819	75,548	86,5721
CO ₂	-	-	-	3,3620

Pressões Parciais P_{0ji} [kPa]

Figura 4.13 – Pressões Parciais P_{0ji}

Então a entropia molar de referência é:

Entropia Molar \bar{s}_i^0 [kJ/kmol.K]					
	1	2 e 3	4 a 8	9 e 10	11 a 16
Componente	Ar	Gás Natural	Mistura	G. Escape	AT+BT
CH ₄	-	186,9	210,8	-	-
C ₂ H ₆	-	253,6	277,6	-	-
C ₃ H ₈	-	306,6	330,6	-	-
n-C ₄ H ₁₀	-	195,7	219,7	-	-
i-C ₄ H ₁₀	-	198,5	222,6	-	-
n-C ₅ H ₁₂	-	177,5	201,5	-	-
i-C ₅ H ₁₂	-	43,46	67,44	-	-
H ₂ O (g)	-	-	-	236,6	-
H ₂ O (l)	-	-	-	-	69,95
O ₂	218	-	218,5	230,2	-
N ₂	193,5	252,8	193,9	192,8	-
CO ₂	-	-	-	242	-

Figura 4.14 – Entropia Molar às Condições de Referência por Componente

Finalmente recorrendo a (4.10) e a (4.11) e a título de exemplo para o fluxo no ponto 8 teremos:

$$\begin{aligned}
 \text{- Entalpia: } \bar{h}_8^0 = & (y_{\text{CH}_4/8} \times \bar{h}_{\text{CH}_4}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{C}_2\text{H}_6/8} \times \bar{h}_{\text{C}_2\text{H}_6}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{C}_3\text{H}_8/8} \times \bar{h}_{\text{C}_3\text{H}_8}(25^\circ\text{C})) + \\
 & (y_{\text{nC}_4\text{H}_{10}/8} \times \bar{h}_{\text{nC}_4\text{H}_{10}}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{iC}_4\text{H}_{10}/8} \times \bar{h}_{\text{iC}_4\text{H}_{10}}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{nC}_5\text{H}_{12}/8} \times \bar{h}_{\text{nC}_5\text{H}_{12}}(25^\circ\text{C})) + \\
 & (y_{\text{iC}_5\text{H}_{12}/8} \times \bar{h}_{\text{iC}_5\text{H}_{12}}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{O}_2/8} \times \bar{h}_{\text{O}_2}(25^\circ\text{C})) + (y_{\text{N}_2/8} \times \bar{h}_{\text{N}_2}(25^\circ\text{C})) =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (0,05191273 \times (-74595)) + (0,00294140 \times (-83846)) + (0,00069725 \times (-104674)) + \\
&(0,000211 \times 36439) + (0,00010802 \times 34811) + (0,00000089 \times (-150,3)) + (0,00000296 \times (- \\
&25256)) + (0,198338314 \times 0) + (0,74578743 \times 0) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow \bar{h}_g^0 = \underline{-4180,66 \text{ kJ/kmol.}}
\end{aligned}$$

- Entropia: $\bar{s}_g^0 = (y_{\text{CH}_4/8} \times \bar{s}_{\text{CH}_4}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{CH}_4/8})) + (y_{\text{C}_2\text{H}_6/8} \times \bar{s}_{\text{C}_2\text{H}_6}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{C}_2\text{H}_6/8})) +$
 $(y_{\text{C}_3\text{H}_8/8} \times \bar{s}_{\text{C}_3\text{H}_8}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{C}_3\text{H}_8/8})) + (y_{\text{nC}_4\text{H}_{10}/8} \times \bar{s}_{\text{nC}_4\text{H}_{10}}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{nC}_4\text{H}_{10}/8})) +$
 $(y_{\text{iC}_4\text{H}_{10}/8} \times \bar{s}_{\text{iC}_4\text{H}_{10}}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{iC}_4\text{H}_{10}/8})) + (y_{\text{nC}_5\text{H}_{12}/8} \times \bar{s}_{\text{nC}_5\text{H}_{12}}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{nC}_5\text{H}_{12}/8})) +$
 $(y_{\text{iC}_5\text{H}_{12}/8} \times \bar{s}_{\text{iC}_5\text{H}_{12}}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{iC}_5\text{H}_{12}/8})) + (y_{\text{O}_2/8} \times \bar{s}_{\text{O}_2}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{O}_2/8})) +$
 $(y_{\text{N}_2/8} \times \bar{s}_{\text{N}_2}(25^\circ\text{C}, P_{0,\text{N}_2/8})) = (0,05191273 \times 210,8) + (0,00294140 \times 277,6) +$
 $(0,00069725 \times 330,6) + (0,000211 \times 219,7) + (0,00010802 \times 222,6) + (0,00000089 \times 201,5) +$
 $(0,00000296 \times 67,44) + (0,19833831 \times 218,5) + (0,74578743 \times 193,9) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \bar{s}_g^0 = \underline{200,006 \text{ kJ/kmol.K.}}$

Para todos os fluxos apresenta-se o quadro da entalpia e entropia molares de referência $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$:

Fluxos em i	$\bar{s}_i^0 [\text{kJ/kmol.K}]$	$\bar{h}_i^0 [\text{kJ/kmol}]$
1	198,647	0
2 a 3	191,991	-74775,60
4 a 8	200,006	-4180,66
9 a 10	199,036	-166603,0
11 a 16	69,92	-285813,0

Figura 4.15 – Entropia e Entalpia Molar às Condições de Referência por Fluxo

Para a determinação da exergia e como já indicado anteriormente, apenas serão calculadas a exergia física e a exergia química. A exergia física é expressa por (4.17), tendo já todas as variáveis sido determinadas, teremos:

Fluxos em i	\bar{x}_i^f [kJ/kmol]	\bar{x}_i^{ch} [kJ/kmol]	\bar{x}_i [kJ/kmol]
1	0	128,490	128,490
2	0	893249,70	893249,70
3	0	893249,70	893249,70
4	0	49489,83	49489,83
5	4062,01	49489,83	53551,84
6	4062,01	49489,83	53551,84
7	3343,56	49489,83	52883,40
8	2578,25	49489,83	52068,08
9	149576	656,71	150232,71
10	142922	656,71	143578,71
11	48,6896	900	948,6896
12	65,6397	900	965,6397
13	432,729	900	1332,730
14	282,030	900	1182,030
15	483,880	900	1383,880
16	522,151	900	1422,151

Figura 4.16 – Exergia Molar Física por Fluxo

- **Fluxos Gasosos com Condensação - Fracções**

Os fluxos que apresentam condensação, são os fluxos dos gases de escape, de $i = 9$ a 10. Devido a este facto tem que se reavaliar a entalpia, entropia e exergia para estes fluxos. Primeiro é necessário determinar o ponto de orvalho (lei de Dalton) e verificar as novas fracções molares dos fluxos dos gases de escape.

Para uma temperatura de 25°C o vapor de água encontra a saturação no sentido da condensação para uma pressão de 3,169 kPa. Aplicando (4.27) ao fluxo 9:

$$P_{H_2O/9} = 0,0634974 \times 101,3 = 6,4323 \text{ kPa}. \therefore 6,4323 > 3,169 \text{ kPa} \therefore \text{Ocorre condensação.}$$

Por (4.33), determina-se a pressão parcial do vapor de água. Resolvendo em função da y^* , determina-se a respectiva fracção molar:

$$y_{H_2O(g)}^* = \frac{P_{sat}(25^\circ C)}{P_0} = \frac{3,169}{101,3} = 0,031283$$

Considerando que as quantidades de moles iguais às fracções molares, para P(25°C), $n_j = y_j$, ou seja:

$$n_{O_2} = y_{O_2} = 0,0487029;$$

$$n_{CO_2} = y_{CO_2} = 0,0331885;$$

$$n_{N_2} = y_{N_2} = 0,85461127.$$

Determina-se de seguida as novas y^* fracções para os outros componentes, por (4.30). Para determinar $n_{H_2O(g)}$, ter-se-á:

$$\begin{aligned} y_{H_2O}^* &= \frac{n_{H_2O(g)}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2} + n_{H_2O(g)}} \Leftrightarrow n_{H_2O(g)} = \frac{y_{H_2O}^* \times (n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2})}{1 - y_{H_2O}^*} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow n_{H_2O(g)} &= \frac{y_{H_2O}^* \times (n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2})}{1 - y_{H_2O}^*} = \\ &= \frac{0,031283 \times (0,0487029 + 0,0331885 + 0,85461127)}{1 - 0,03183} = 0,03026 \end{aligned}$$

Para os outros componentes:

$$\begin{aligned} y_{O_2}^* &= \frac{n_{O_2}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2} + n_{H_2O(g)}} \\ &= \frac{0,0487029}{0,0487029 + 0,0331885 + 0,85461127 + 0,03026} = 0,050377. \end{aligned}$$

$$y_{CO_2}^* = \frac{n_{CO_2}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2} + n_{H_2O(g)}} = 0,03433.$$

$$y_{N_2}^* = \frac{n_{N_2}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{N_2} + n_{H_2O(g)}} = 0,883993.$$

Pela equação (4.26) determina-se $n_{H_2O(l)}$:

$$n_{H_2O(g)} = n_{H_2O} - n_{H_2O(l)} = 0,0634974 - 0,03026 = 0,033237.$$

Considerando novamente a relação $n_j = y_j$, e à pressão de referência, apresenta-se a seguinte tabela:

Fracções na Condensação		
Fluxos i = 9 a 10	y	y^*
O₂	0,0487029	0,050377
CO₂	0,0331885	0,034330
N₂	0,85461127	0,883993
H₂O (g)	0,030260	0,031283
H₂O (l)	0,033237	-

Figura 4.17 – Fracções Molares – Condensações – Fluxos Gasosos

Por fim determina-se $y_{liquida}$ e y_{gasosa} através de (4.31) e (4.32); substituindo:

$$y_{liquida} = \frac{0,033237}{0,0487029 + 0,0331885 + 0,85461127 + 0,030260 + 0,033237} = 0,033237.$$

$$y_{gasosa} = \frac{0,0487029 + 0,0331885 + 0,85461127 + 0,030260}{0,0487029 + 0,0331885 + 0,85461127 + 0,030260 + 0,033237} = 0,96676.$$

- **Determinação da Entalpia e Entropia Molar de Referência e da Exergia nos Fluxos com Condensação**

Uma vez determinadas as fracções nos fluxos com condensação, a entalpia em 9 e 10 por (4.13), será:

$$\begin{aligned} \bar{h}_9^0 &= y_{O_2/9} \times \bar{h}_{O_2}(25^\circ C) + y_{CO_2/9} \times \bar{h}_{CO_2}(25^\circ C) + y_{N_2/9} \times \bar{h}_{N_2}(25^\circ C) + \\ &+ y_{H_2O(l)/9} \times \bar{h}_{H_2O(l)}(25^\circ C) + y_{H_2O(g)/9} \times \bar{h}_{H_2O(g)}(25^\circ C) = \\ &= (0,0487029 \times 0) + (0,0331885 \times (-393486)) + (0,85461127 \times 0) + (0,033237 \times \\ &(-285813)) + (0,030260 \times (-241811)) = -29876 \text{ kJ/kmol.} \end{aligned}$$

$$\bar{h}_{10}^0 = \bar{h}_9^0 = -29876 \text{ kJ/kmol.}$$

A determinação da entropia segue a expressão (4.14), mas primeiramente determinam-se as pressões parciais de acordo com (4.15). Apresenta-se a tabela 5.13, já com as pressões parciais calculadas e as novas entropias determinadas:

Pressões Parciais [kPa] – Fluxos c/ Condensação

Componentes	y^*	Fluxos i = 9 a 10	\bar{s}_i^0 [kJ/kmol.K]
O ₂	0,050377	5,10319 [kPa]	229,9
CO ₂	0,034330	3,47763 [kPa]	241,7
N ₂	0,883993	89,5485 [kPa]	192,5
H ₂ O (g)	0,031283	3,1690 [kPa]	217,5
H ₂ O (l)	-	101,3 [kPa]	69,95

Figura 4.18 – Pressões Parciais nos Fluxos com Condensação e Entropia de Referência

Então aplicando (4.14):

$$\begin{aligned} \bar{s}_9^0 &= y_{O_2/9} \times \bar{s}_{O_2}(25^\circ C, P_{0/O_2/9}) + y_{CO_2/9} \times \bar{s}_{CO_2}(25^\circ C, P_{0/CO_2/9}) + \\ &y_{N_2/9} \times \bar{s}_{N_2}(25^\circ C, P_{0/N_2/9}) + y_{H_2O(l)/9} \times \bar{s}_{H_2O(l)}(T_0 = 25^\circ C, P_0 = 101,3 \text{ kPa}) + \\ &+ y_{H_2O(g)/9} \times \bar{s}_{H_2O(g)}(25^\circ C, P_{0/H_2O(g)/9}) = \end{aligned}$$

$$= (0,050377 \times 229,9) + (0,034330 \times 241,7) + (0,883993 \times 192,5) + \\ + (0,031283 \times 217,5) + (0,033237 \times 69,95) = 199,177 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$$

E ainda: $\bar{s}_{10}^0 = \bar{s}_9^0 = 199,177 \text{ kJ/kmol.K}$.

Para determinar a exergia nos fluxos com condensação, recorre-se a (4.17) e a (4.20). A exergia molar física para os fluxos 9 e 10, são respectivamente:

$$- \bar{x}_9^f = 12891,70 \text{ kJ/kmol};$$

$$- \bar{x}_{10}^f = 6237,24 \text{ kJ/kmol}.$$

Aplicando (4.20) determina-se a exergia química para estes dois fluxos:

$$\bar{x}_9^{ch} \\ = y_{gasosa} \cdot \left[\begin{pmatrix} y_{O_2/9}^* \cdot \bar{x}_{O_2}^{ch} + \\ y_{CO_2/9}^* \cdot \bar{x}_{CO_2}^{ch} + \\ y_{N_2/9}^* \cdot \bar{x}_{N_2}^{ch} + \\ y_{H_2O(g)/9}^* \cdot \bar{x}_{H_2O(g)}^{ch} \end{pmatrix} + T_0 \cdot \bar{R} \cdot \begin{pmatrix} y_{O_2/9}^* \cdot \ln(y_{O_2}^*) + \\ y_{CO_2/9}^* \cdot \ln(y_{CO_2}^*) + \\ y_{N_2/9}^* \cdot \ln(y_{N_2}^*) + \\ y_{H_2O(g)/9}^* \cdot \ln(y_{H_2O(g)}^*) \end{pmatrix} \right] + y_{liquida} \cdot \bar{x}_{H_2O(l)}^{ch}$$

Substituindo valores:

$$\bar{x}_9^{ch} \\ = 0,96676 \cdot \left[\begin{pmatrix} 0,050377 \times 3970 + \\ 0,034330 \times 19900 + \\ 0,883993 \times 720 + \\ 0,031283 \times 9500 \end{pmatrix} + 298,15 \times 8,314 \cdot \begin{pmatrix} 0,050377 \times (-2,9882) + \\ 0,034330 \times (-3,3717) + \\ 0,883993 \times (-0,1233) + \\ 0,031283 \times (-3,4647) \end{pmatrix} \right] \\ + 0,033237 \times 900 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \bar{x}_9^{ch} = 627,274 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Então: $\bar{x}_{10}^{ch} = \bar{x}_9^{ch} = 627,274 \text{ kJ/kmol}$.

Por (4.16), a exergia molar nos fluxos 9 e 10 são:

$$\bar{x}_9 = 12891,70 + 627,274 = 13519,97 \text{ kJ/kmol};$$

$$\bar{x}_{10} = 6237,24 + 627,274 = 6864,51 \text{ kJ/kmol}.$$

Apresenta-se uma tabela resumo das propriedades alteradas devido à condensação do vapor de água nos fluxos gasosos dos gases de escape do motor:

Propriedades Termodinâmicas c/ Condensação

Fluxos	\bar{h}_i^0 [kJ/kmol]	\bar{s}_i^0 [kJ/kmol.K]	\bar{x}_i [kJ/kmol]
9	- 29876	199,177	13519,97
10	- 29876	199,177	6864,51

Figura 4.19 – Resumo das Propriedades após Condensação

- **Trabalho e Calor na Turbina**

Calor específico a pressão constante no ponto 9 (resultados obtidos via software EES):

- $C_{p_{H_2O}} = 40$ kJ/kmol.K

- $C_{p_{O_2}} = 34,16$ kJ/kmol.K

- $C_{p_{N_2}} = 32,06$ kJ/kmol.K

- $C_{p_{CO_2}} = 52,94$ kJ/kmol.K; considerando as frações molares de cada componente,

$C_{p_{fluxo/9}} = 33,3594$ kJ/kmol.K.

Calor, \dot{Q}_{TBR} :

O calor perdido na turbina, é: $\dot{Q}_{TBR} = \dot{n} \times C_{p_{fluxo/9}} \times (T_9 - T_{10}) \Leftrightarrow \dot{Q}_{TBR} = 0,08345 \times 33,3594 \times (893,15 - 683,15) \Leftrightarrow \dot{Q}_{TBR} = 584,607$ kW.

Trabalho, \dot{W}_{TBR} :

Por outro lado o trabalho produzido na turbina é: $\dot{W}_{TBR} = \dot{n} \times (h_9 - h_{10}) \Leftrightarrow \dot{W}_{TBR} = 0,08345 \times (-9798,34 + 16637,90) \Leftrightarrow \dot{W}_{TBR} = 570,761$ kW.

- **Recolha de dados, Temperatura e Pressão no Motor**

Os valores de pressão e de temperatura expostos nos vários pontos do motor foram encontrados ou recolhidos da seguinte forma:

Ponto	Temperatura	Pressão
1 a 4	Ambiente / Referência	Ambiente / Referência
5	Ficha Técnica Caterpillar®	Ficha Técnica Caterpillar®
6	Igual ao ponto 6	Igual ao ponto 6
7	Dado Interno Caterpillar®	Dado Interno Caterpillar®
8	Ficha Técnica Caterpillar®	Ficha Técnica Caterpillar®
9	Sonda do Motor (recolha local)	Sonda do Motor (recolha local)
10	Ficha Técnica Caterpillar®	Ambiente / Referência
11	Ficha Técnica Caterpillar®	Instalação: (ΔP_{INST}) até pto. 11
12	Ficha Técnica Caterpillar®	Dado Interno Caterpillar® (ΔP_{BT})
13	Ficha Técnica Caterpillar®	Instalação: (ΔP_{INST}) até pto. 13
14	Dado Interno Caterpillar®	Dado Interno Caterpillar®
15	Dado Interno Caterpillar®	Dado Interno Caterpillar®
16	Ficha Técnica Caterpillar®	Dado Interno Caterpillar® (ΔP_{AT})

Figura 4.20 – Origem dos Dados Temperatura e Pressão

Apresentam-se os valores de calor em jogo e o sentido da sua transferência (atm: atmosfera):

Fluxos em i	\dot{Q}[kW]	Sentido
1	0	atm – Motor
2 a 3	0	-
4	0	-
5	300+144	CPR p/ mistura
6	0	-
7	300	AS1 p/ AT
8	144	AS2 p/ BT
9	1198	PTM p/ Gases Escape
10	584,607	GEP p/ Turbina
11	0	-
12	144	AS2 p/ BT
13	0	-
14	124	PTO p/ AT
15	300	AS1 p/ AT
16	415	BCM p/ AT
atm	109	Irradiado Motor
atm	56	Irradiado Alternador

Figura 4.21 – Transferências de Calor

5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se a tabela com as propriedades termodinâmicas do sistema em estudo, nos seus vários pontos dos fluxos:

Ponto	Fluxo	T [°C]	P [kPa]	\dot{n} [kmol/s]	\bar{h} [kJ/kmol]	\dot{E} [kW]	\bar{s} [kJ/kmol.K]	\dot{S} [kW/K]	\bar{x} [kJ/kmol]	\dot{X} [kW]
1	Ar	25	101,33	0,08210	0	0	198,647	16,31	128,49	10,55
2	Gás Natural	25	101,33	0,004862	-74775,6	-363,56	191,991	0,93	893249,7	4342,98
3	Gás Natural	25	101,33	0,004862	-74775,6	-363,56	191,991	0,93	893249,7	4342,98
4	Mist. Ar+Gás	25	101,33	0,08692	-4180,66	-363,38	200,006	17,38	49489,83	4301,66
5	Mist. Ar+Gás	214	310,70	0,08692	1530,15	133,00	205,536	17,87	53551,84	4654,73
6	Mist. Ar+Gás	214	310,70	0,08692	1530,15	133,00	205,536	17,87	53551,84	4654,73
7	Mist. Ar+Gás	158,25	296	0,08692	-183,923	-15,99	202,197	17,57	52883,4	4596,63
8	Mist. Ar+Gás	45	284	0,08692	-3588,22	-311,89	193,346	16,81	52068,08	4525,76
9	G. de Escape	620	270	0,08692	-9798,34	-851,672	223,28	19,41	13519,97	1175,16
10	G. de Escape	410	101,3	0,08692	-16637,9	-1446,17	222,658	19,35	6864,51	596,66
11	Água (BT)	44	285	0,478	-284380	-135933,64	74,593	35,66	948,6896	453,474
12	Água (BT)	48	90	0,478	-284081	-135790,72	75,539	36,11	965,6397	461,576
13	Água (AT)	87	250	1,590	-281137	-447007,83	84,182	133,85	1332,73	2119,041
14	Água (AT)	88	200	1,590	-281062	-446888,58	84,939	135,05	1182,03	1879,428
15	Água (AT)	91	150	1,590	-280836	-446529,24	85,02	135,18	1383,88	2200,369
16	Água (AT)	94	90	1,590	-280609	-446168,31	85,653	136,19	1422,151	2261,220

Figura 5.1 – Propriedades Termodinâmicas do Sistema

Componente	Designação	\dot{S}_{entrada} [kW/K]	$\dot{S}_{\text{saída}}$ [kW/K]	\dot{S}_{ger} [kW/K]
VRG	Válvula Reguladora de Gás	0,93	0,93	0,0
MAG	Mistura Ar-Gás Natural	17,24	17,38	0,140
CPR	Compressor	17,38	19,724	2,344
VRM	Válvula Reguladora da Mistura	17,87	17,87	0,0
AS1	1ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	152,92	153,756	0,8362
AS2	2ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	53,23	53,403	0,173
PTMt	Produção de Trabalho total	-	-	-
PTM	Produção de Trabalho	16,81	23,794	6,984
BCM	Bloco do Motor	135,18	138,999	3,818
PTO	Permutador de Óleo	133,85	135,466	1,616
TBR	Turbina	19,41	21,311	1,901
ALT	Alternador	-	0,188	0,188
GBL	Global	186,75	194,306	7,556

Figura 5.2 – Entropia Gerada

Por (2.8) apresentam-se os resultados da tabela 5.3:

Componente	Designação	\dot{X}_D [kW]
VRG	Válvula Reguladora de Gás	0,0
MAG	Mistura Ar-Gás Natural	41,741
CPR	Compressor	698,864
VRM	Válvula Reguladora da Mistura	0,0
AS1	1ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	249,313
AS2	2ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	51,58
PTMt	Produção de Trabalho total	-
PTM	Produção de Trabalho	2028,28
BCM	Bloco do Motor	1138,34
PTO	Permutador de Óleo	482,0
TBR	Turbina	566,783
ALT	Alternador	56,05
GBL	Global	2252,82

Figura 5.3 – Exergia Destruída

Componente	Designação	η_I [%]	η_{II} [%]	ϵ [%]	γ_D [%]
VRG	Válvula Reguladora de Gás	100	100	100	0
MAG	Mistura Ar-Gás Natural	100	99,0	98,80	0,552
CPR	Compressor	86,97	83,91	95,53	9,24
VRM	Válvula Reguladora da Mistura	100	100	100	0
AS1	1ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	86,15	94,26	IND	3,30
AS2	2ª Etapa – Arref. Sobrealimentador	32,48	98,81	11,27	0,682
PTMt	Produção de Trabalho total	-	-	-	-
PTM	Produção de Trabalho	IND.	53,30	25,97	26,80
BCM	Bloco do Motor	99,91	73,79	IND	15,0
PTO	Permutador de Óleo	99,97	88,90	88,69	6,37
TBR	Turbina	96,0	86,94	99,34	7,50
ALT	Alternador	96,62	98,71	-	0,74
GBL	Global	37,0	36,80	72,0	29,78

Figura 5.4 – Rendimentos

Apesar do indicado no ponto 2.2 em relação às expressões para os rendimentos, há que particularizar para os seguintes componentes:

- AS1 e AS2

$$\eta_I = \frac{(\dot{E}_s - \dot{E}_e)_{fluxo\ frio}}{(\dot{E}_e - \dot{E}_s)_{fluxo\ quente} + \dot{Q}_{AS1, AS2}} \quad (5.1)$$

- Turbina e Compressor

$$\text{Compressor: } \eta_I = \frac{\dot{E}_s - \dot{E}_e}{\dot{W}_{CPR}} \quad (5.2)$$

$$\text{Turbina: } \eta_I = \frac{\dot{W}_{TBR}}{\dot{E}_e - \dot{E}_s} \quad (5.3)$$

- Global

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{ALT}}{\dot{n}_3 \times PCI_{Gás\ Natural}} \quad (5.4)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{ALT}}{\dot{X}_3} \quad (5.5)$$

- Outras Observações

O componente PTM não foi avaliado no seu rendimento energético, uma vez sendo o produtor de trabalho, o volume de controlo não expressa de forma efectiva as entradas neste componente, pelo que o rendimento energético neste caso é expresso de forma adequada pelo rendimento global, utilizando (5.4). Para o Gás Natural exposto, considerou-se aproximadamente $1 \text{ kJ/kg} \approx 16,041 \text{ kJ/kmol}$.

Considera-se também que (5.1) é aplicável para a determinação de ϵ , substituindo os parâmetros da energia pelo da exergia, \dot{X}_i .

5.1 DISCUSSÃO

Pode-se desde já constatar que os valores de geração de entropia e de exergia para as válvulas VRG e VRM serem os valores esperados pela falta de informação do fabricante, e por se considerar que eram isentrópicas, pelo que não existe geração de entropia nem destruição de exergia ocorre nestas válvulas, rendimentos são 100%.

Como é esperado também, a geração de entropia será tanto maior quanto maiores forem as irreversibilidades nos vários componentes. Verifica-se que as maiores irreversibilidades são geradas no conjunto PTMt – PTM e BCM, onde de facto existem

muitos mecanismos sujeitos a elevada fadiga e onde se dá reacção química de combustão. A turbina e compressor são também locais de elevada destruição de exergia.

Por outro lado, nos componentes PTO, AS1 e BCM é difícil de verificar o grau de perfeição termodinâmico, já que trata-se de um único circuito que passa pelo permutador de óleo, sem elementos do “lado quente” por parte do fabricante e também na refrigeração do bloco do motor (BCM) onde já existem verdadeiramente dados da água que vai refrigerar a envolvente das câmaras de combustão, e vindo já com dois acúmulos energéticos (PTO e AS1). Também, a determinação do rendimento energético de PTM é insuficiente pela formulação de (2.14).

As irreversibilidades são devidas aos vários fenómenos, sujeitos às leis universais da termodinâmica, conjugados com a degradação natural dos materiais e o aumento da sua desordem, onde a entropia desempenha um papel essencial: atritos em todos os componentes mecânicos cinemáticos, resistências térmicas entre componentes, gradientes de calor localizados em pontos desfavoráveis na arquitectura do motor (cavidades do bloco do motor, por exemplo), misturas ineficientes, perdas por convecção e irradiação térmica nos processos termodinâmicos, perdas por condução através dos materiais, erosão por surgimento de humidade em componentes metálicos, etc.

Por outro lado, as irreversibilidades significam que energia que poderia ser convertida em trabalho, acabou por ser destruída, ou seja, houve também a destruição de exergia, pelo que a maior ou menor exergia depende das maiores ou menores irreversibilidades encontradas no sistema.

Através da análise dos componentes com maiores irreversibilidades, e com maiores perdas exérgicas, estes poderão ser os componentes do grupo gerador onde se poderá melhorar os rendimentos destes, pela introdução de processos específicos mais eficientes, alterações aos desenhos destes, reconfiguração de vários componentes, recalibrações, etc. A análise exérgica mostra-se como uma ferramenta útil de verificação de falhas de um produto acabado em concorrência num mercado competitivo e onde a eficiência energética e ambiental são temas urgentes e diferenciadores no estado actual de desenvolvimento da sociedade.

Apesar de estarmos perante um grupo gerador inserido numa central de cogeração, as ineficiências detectadas podem ser alvo de aproveitamento próprio, no decorrer da concepção e projecto do grupo gerador, ou seja, este incorporar de fábrica, sistemas adicionais que

permitam recuperar transferências térmicas internas, no sentido de aumentar o rendimento da máquina. Um exemplo prático, poderia ser a utilização de um sistema ORC (Organic Rankine Cycle) acoplado ao sistema de gases de escape; utilização de algum trabalho mecânico para a implementação de mini-centrifugadoras de óleo, para que o óleo mantenha sempre as propriedades ótimas para o seu processo de lubrificação (e refrigeração); melhoria de software para um controlo mais eficiente do sistema de ignição pela regulação mais rápida do “timing” do motor (também função do número de metano do gás natural).

5.1.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões futuras, uma análise exergética pode ser acompanhada por diagramas de Sankey e de Grassmann, onde é possível visualizar os fluxos de energia pelos vários componentes do sistema, de forma gráfica, dando assim uma outra dimensão dos números de exergia em questão.

É também habitual que se realizem análises exergoeconómicas que permitem avaliar os custos associados às irreversibilidades e à destruição de exergia de determinado sistema.

Outra proposta para melhoria de uma análise semelhante, é considerar a variação das densidades dos diversos componentes das substâncias dos fluxos, nos vários pontos, onde variam a temperatura e a pressão.

Por fim sugere-se ainda que a resolução da equação da combustão seja realizada com mais espécies para além das consideradas neste trabalho, tentando aproximar esta dos valores expressos pelo fabricante do grupo gerador.

De referir ainda que este tipo de máquinas, máquinas alternativas de combustão interna, apresentam valores de rendimento energético e exergético, baixos, como produtores de energia e numa sociedade onde o recurso a combustíveis fósseis está cada vez mais colocada em causa. Existem soluções ecologicamente mais avançadas que colocam em causa este tipo de máquinas, como as máquinas principais de produção contínua de energia. São utilizadas no entanto, como máquinas de backup, em modo de emergência (grupos a Diesel). Apesar dos motores a gás natural serem menos agressivos que outros combustíveis fósseis em termos ambientais, continua a ser uma máquina com rendimento limitado e de complexa manutenção. (O mercado marítimo e de petróleo é um mercado que utiliza muitos grupos geradores ou motores propulsores como fonte primária de produção de trabalho).

6 MANUTENÇÃO

6.1 MANUTENÇÃO E SUSTENTABILIDADE

Nos dias de hoje, cada vez mais as instalações industriais são encaradas como um sistema global e orgânico, e com um ciclo de vida pré-determinado. Dados os elevados custos económicos da exploração de uma unidade industrial, leva-se à ponderação e estudo de alguns factores fundamentais que guiam a viabilidade e a manutenção das instalações industriais à luz das novas filosofias de desenvolvimento sustentável.

O produto da dinâmica das interacções destes factores, determinam a exequibilidade tecno-económica e ambiental de um sistema industrial ao longo do tempo. Os principais factores de análise são: Sustentabilidade, Gestão da Manutenção, Disponibilidade, Fiabilidade e Impacto Ambiental. Pode-se representar as suas interacções da seguinte forma (Boroumandjazi et al., 2012):

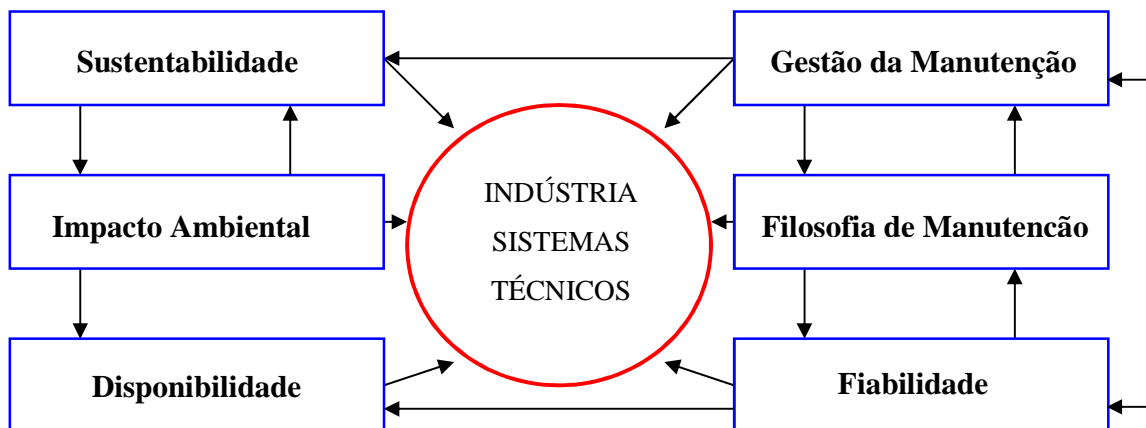


Figura 6.1 - Relação entre Factores de Manutenção

Na perspectiva da sustentabilidade e do impacto ambiental, pode-se começar por analisar a exergia como o potencial de trabalho incorporado num determinado material ou recurso (alimentos, combustíveis, produtos transformados). Por muitos anos a importância da exergia, como parâmetro dos factores de produção, não foi devidamente considerado, sobretudo pelos economistas e analistas das macro transformações da economia e da indústria.

A importância da qualidade dos recursos do planeta (como os diversos minérios, água, ar, etc.), foi pela primeira vez considerada por Nicholas Georgescu-Roegen (1971) com

fundamentação na 2ª lei da termodinâmica, tendo este salientado que o sistema económico é dependente da utilização das matérias-primas de baixa entropia (ex.: combustíveis fósseis) sendo transformados em produtos de elevada entropia (ex.: combustão nos motores de combustão interna, produtos finais de uma cadeia de valor, etc.).

Os recursos tornam-se indisponíveis independentemente da energia - afirmação por vezes considerada como a 4ª lei da termodinâmica; esta surge também como conceito da Negentropia, sob a forma de que os recursos naturais seriam formas organizadas de reservas acumuladas, que se formaram ao longo de milhões de anos.

6.2 MANUTENÇÃO, SUSTENTABILIDADE E EXERGIA

A engenharia e a comunidade científica passaram a olhar para este tema com mais realce, tendo trazido o importante contributo de se ter começado a distinguir entre as análises de energia e dos recursos naturais, de acordo com a 1ª e 2ª lei da termodinâmica (anos 70, do século passado). A primeira tentativa sistemática de se utilizar a exergia como um parâmetro de medida da qualidade dos recursos utilizados, terá acontecido na Suíça nos anos 80, do séc. XX. É actualmente claro que a eficiência energética de acordo com a 2ª lei da termodinâmica, nas sociedades actuais, é baixa. Nakićenovic et al. (1996), estima que a utilização primária da energia tem uma eficiência de cerca de 30%, enquanto que a eficiência exergética é de apenas aproximadamente 10%.

A exergia pode ser considerada como uma medida de inputs e outputs. Cerca de 95% da exergia dos recursos utilizados (inputs) é gasta em todos os processos da indústria e da sociedade. Estes desperdícios de energia são dissipados no meio ambiente. Convém salientar que o aumento potencial da entropia, tem o potencial de disrupção do balanço das estruturas dissipativas; por este motivo, o aumento de entropia pode ser uma fonte de danos ambientais.

Um outro ponto de análise, evidenciado pelos estudos da exergia, é o facto de que o objectivo ambientalista de "zero emissões", ser impossível devido à conservação de massa (sistema fechado - planeta Terra). No entanto, a exergia inerente à ocorrência de desperdícios decorrentes dos processos industriais (e sociais), pode ser teoricamente reduzida até zero (apenas teoricamente, já que zero implicaria a existência de equipamentos de eficiência exergética próxima de 100% - isenta de irreversibilidades).

A determinação da exergia dos resíduos pode ser feita de acordo com duas abordagens: a primeira (Wolfgang et Ayres, 1995), tentando-se obter o conhecimento detalhado da composição química dos resíduos; uma vez feito este detalhe, procede-se ao cálculo da exergia pelas equações correntes na literatura actual, relativa à exergia. Este processo revela-se muito complexo e demorado.

Segunda, utilizando a equação de balanço da exergia:

$$X_{in} = X_{product} + \Delta X_{process} + X_{waste} \quad (6.1)$$

onde $\Delta X_{process}$ representa a exergia interna perdida no processo de transformação; X_{waste} é a exergia dos resíduos e $X_{product}$ é a exergia do produto obtido no processo de transformação. Recorre-se também ao formulário actual relativo à exergia, para determinação das exergias dos inputs.

Em qualquer dos processos a determinação da exergia num processo industrial e a extrapolação para a qualidade dos processos de transformação dos recursos e a qualidade destes, é um processo complexo, mesmo recorrendo a programas de computador dedicados, já que a determinação das características químicas dos inputs pode ser de avaliação difícil e imprecisa (energia de Gibbs, entalpia de combustão a temperaturas não standard, etc., são parâmetros de difícil obtenção).

Esta breve exposição da exergia numa perspectiva ambiental e de sustentabilidade para um gestor mais avisado pode ter resultados significativos a médio e a longo prazo, na exploração de uma instalação industrial, com impacto na tomada de decisões, nas várias estruturas de uma corporação, tais como, numa central de compras ou na obtenção de licenças ambientais, seleção de equipamentos conforme a legislação ambiental actual, bem como também tornar a actividade elegível em determinados territórios. Uma empresa que respeite o ambiente é uma empresa bem posicionada na moral da sociedade, com benefícios óbvios para esta.

A sustentabilidade de um sistema caracteriza-se pela capacidade desse sistema manter um conjunto de características e parâmetros chave dentro de determinados valores, considerando os equilíbrios entre o que se retira dos recursos e a produção, e os resíduos inerentes ao processo de transformação dos recursos e matérias-primas. Este conceito estende-se a um inúmero conjunto de actividades humanas sociais, económicas, científicas e industriais. Um sistema sustentável deve interagir entre todos os factores principais da

manutenção, alcançando um balanço óptimo entre eles, sendo de destacar a importância da utilização racional do recurso energia. Rosen et Dincer (2008), apresentam um estudo onde correlacionam energia, exergia, sustentabilidade e impacto ambiental, e chegaram à conclusão que a exergia para definir os impactos ambientais da actividade humana, seria melhor compreendida através de um indicador específico:

$$SI = 1/D_p \quad (6.2)$$

onde, SI é o indicador de sustentabilidade e D_p é um parâmetro de razão entre a energia e a exergia: $D_p = X_{xd} / X_{xin}$, ou seja:

$$SI = X_{xin}/X_{xd} \quad (6.3)$$

Ojeda et al. (2011), demonstraram que a análise de SI pode efectivamente melhorar a sustentabilidade, com redução dos impactos ambientais (ex.: emissões de gases perigosos).

Obviamente que SI pode ser melhorado através de uma boa gestão da manutenção com resultados significativos em parâmetros como a fiabilidade, disponibilidade e manutibilidade:

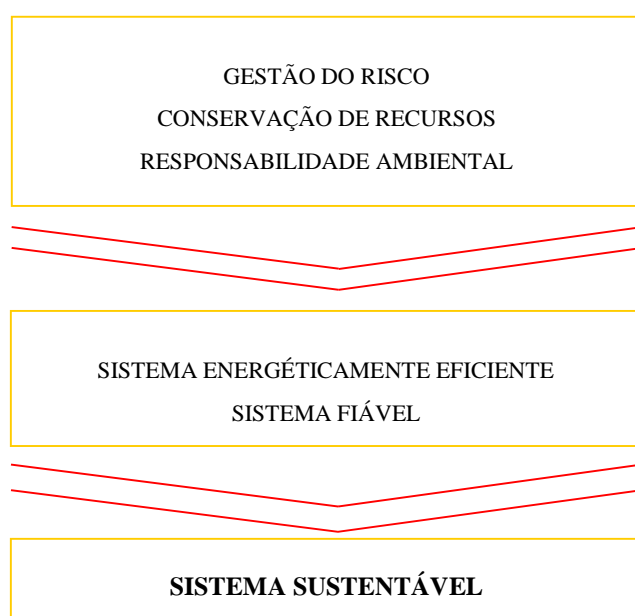


Figura 6.2 - Parâmetros Efectivos na Fiabilidade e Sustentabilidade de um Sistema

Pode-se ainda avaliar a relação entre exergia e sustentabilidade com o seguinte gráfico:

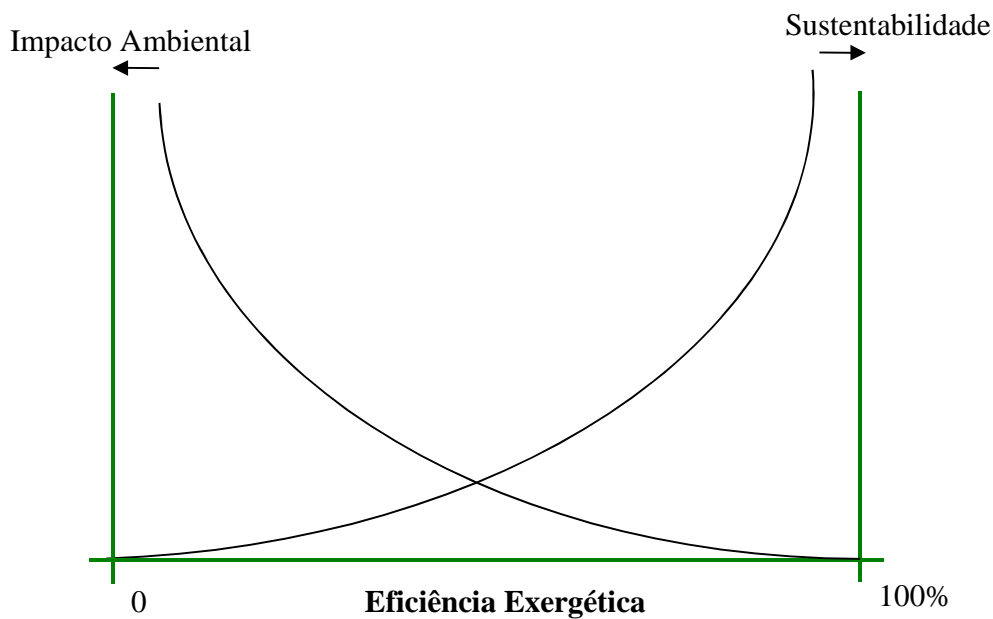


Figura 6.3 – Relações entre Sustentabilidade, Exergia e Ambiente

A figura 6.3, é uma ilustração qualitativa, onde se pode verificar que se a exergia fosse 100%, não existira impacto ambiental e a sustentabilidade tenderia para o infinito.

Existem muitos outros estudos e trabalhos em desenvolvimento, avaliando o impacto que uma boa manutenção tem na eficiência exergética, os benefícios ambientais daí decorrentes, aferindo-se os custos de um sistema industrial (ou outro) e a sua disponibilidade.

6.2.1 Manutenção e Fiabilidade

Considerando-se em particular a manutenção e olhando para as filosofias de gestão mais actuais, os factores inicialmente apontados encontram-se também integrados no conceito da gestão Lean - Lean Production. A gestão lean é um sistema de gestão com provas dadas, sendo que neste sistema de gestão, está integrada a Total Productive Maintenance - TPM, modelo de manutenção sustentado em oito pilares fundamentais:

- Educação e Treino;
- Manutenção Autónoma;
- Manutenção Planeada;
- Melhorias Específicas;
- Segurança Higiene e Meio Ambiente;
- Manutenção da Qualidade;
- Controlo Inicial;
- Gestão Administrativa.

Pode-se dizer também que a gestão lean e a sustentabilidade são bastante similares na sua essência, já que requerem uma perspectiva a longo prazo para poder recolher os benefícios de um investimento não só económico, mas fundamentalmente, um investimento na garantia da própria subsistência industrial. O foco é maior nas pessoas, nos recursos naturais e na rentabilidade a médio e longo prazo. A eliminação dos resíduos e a sua diminuição contínua são fundamentais para a sustentabilidade global das indústrias que se enquadram na filosofia da gestão lean. A melhoria da eficiência dos processos de gestão, dos próprios equipamentos e da tecnicidade das instalações, representam oportunidades de negócio dentro do próprio negócio.

A sustentabilidade como suporte do lean emerge face ao custo gradual dos recursos naturais e da energia, dada a sua procura também cada vez maior e ao paradigma económico que globalmente rege os mercados das matérias-primas. Em sentido contrário a diminuição progressiva dos recursos do planeta é outro factor de escassez a impactar os mercados e a actividade industrial.

Apesar dos conceitos de resíduo ou desperdício serem algo diferentes na sua génese, entre a gestão lean e a sustentabilidade, ambas acabam por convergir no mesmo sentido e intensidade, na resolução da existência e da progressiva eliminação do desperdício. A gestão lean consegue ampliar este conceito e amplificá-lo para o desperdício de energia, procurando que o consumo desta seja o mais eficiente possível com a tecnologia actual, e inevitavelmente absorver os conceitos de eficiência energética e exergética no seio da manutenção, suas filosofias de aplicação e tecnicidades.

A filosofia de gestão TPM, prevê vários indicadores de avaliação do desempenho dos equipamentos e da eficiência da utilização da própria metodologia. Um destes indicadores é o Overall Equipment Efficiency – OEE, e trata-se do produto de três factores: disponibilidade, desempenho e qualidade.

6.2.1.1 Técnicas de Manutenção

De entre as várias metodologias de manutenção, a manutenção centrada na fiabilidade, ou RCM – Reliability Centered Maintenance, tem surgido e sido difundida com bastante sucesso, tendo sido inicialmente desenvolvida pela indústria aeronáutica.

Esta metodologia de manutenção não tem por objectivo a conservação primária de um equipamento, mas sim a função deste; é uma metodologia utilizada para determinar o que

deve ser feito para garantir a continuidade funcional num certo contexto operacional de um qualquer activo.

Para se poder avaliar a fiabilidade existem, os métodos, qualitativo e quantitativo. Os métodos quantitativos comumente utilizados, são: análise de diagramas de blocos de fiabilidade; simulações de Monte Carlo; cadeias de Markov.

Por outro lado, a análise qualitativa tem por ferramentas de análise mais utilizadas as seguintes: Fault Tree Analysis (FTA); Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA); Failure Modes and Effects Analysis (FMEA); Root Cause Analysis (RCA); Fish Bone Analysis (FBA); Event Tree Analysis (ETA); Predictive Failure Analysis (PFA); entre outras ferramentas de análise (algumas destas ferramentas também podem ser quantitativas).

Existem ainda outras metodologias de utilizadas na indústria, como o método RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) e também o método MPM – Maintenance Performance Measurement, tratando-se de um processo multidisciplinar de medição, avaliação e justificação do valor criado pelas técnicas de manutenção utilizadas e o investimento na manutenção.

6.2.1.2 Fiabilidade

Em qualquer destes sistemas, metodologias e técnicas de manutenção, a avaliação adequada da fiabilidade do equipamento, sistema, ou até mesmo do complexo industrial, é essencial para a garantir a qualidade da manutenção e é ainda um parâmetro decisivo e extrapolador de indicadores de suporte à gestão e aos próprios stakeholders que possam existir nas decisões de alto nível de um complexo industrial.

Sendo a fiabilidade (R) um conceito único, caro à engenharia de manutenção, existem várias definições para a fiabilidade, tais como:

“Probabilidade de um sistema realizar um trabalho definido, até à ocorrência de falha que não permita a realização do trabalho definido”

“Característica de um dispositivo expressa pela probabilidade que esse bem tem de cumprir uma função requerida em condições de utilização e por um período de tempo determinado”

Ou de acordo com a norma NP EN 13306:2007, a fiabilidade é:

“A aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.”

A fiabilidade é por definição uma probabilidade, probabilidade de um dispositivo funcionar até ter uma avaria, portanto uma função do tempo, também. É complementar à probabilidade de falha; a fiabilidade, R e a probabilidade de falha F, complementa-se, ou seja:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (6.4)$$

Onde R(t) é a função fiabilidade e F(t) é função de probabilidade acumulada de falhas.

– A fiabilidade é a qualidade ao longo do tempo –

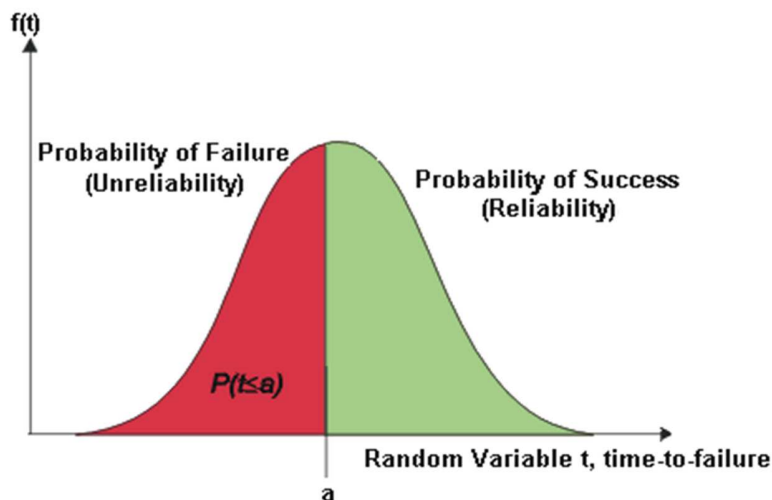


Figura 6.4 – Função Probabilidade da Fiabilidade

A fiabilidade em t é dada pela probabilidade da não avaria do bem antes de atingir o instante t . Tem-se ainda que a probabilidade acumulada de falha é:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (6.5)$$

onde $f(t)$ é a função de probabilidade instantânea, ou seja, função densidade de probabilidade de falhas; então ter-se-á também que:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (6.6)$$

Pode-se ainda elaborar mais um pouco sobre fiabilidade e ainda evocar outros conceitos fundamentais associados á análise da fiabilidade e cruciais para a avaliação da qualidade da manutenção:

- Taxa de avarias:

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.7)$$

- MTBF – Mean Time Between Failures (tempo médio entre falhas):

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (6.8)$$

- MTTR – Mean Time To Repairs (tempo médio entre reparações):

$$MTTR = \frac{\sum \text{Reparações}}{N^{\circ} \text{ de Avarias}} \quad (6.9)$$

- Disponibilidade do equipamento ou bem:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{UPTIME}{UPTIME + DOWNTIME} \quad (6.10)$$

- Curva da Banheira: é a curva característica que representa a vida de um bem durante o seu ciclo de vida; distingue-se basicamente por estar dividida em três partes: mortalidade infantil, onde a taxa e avarias é exponencial no início do ciclo de vida do bem; vida útil, onde a taxa de avarias é constante; envelhecimento, onde a taxa de avarias aumenta com o tempo; a curva típica é:

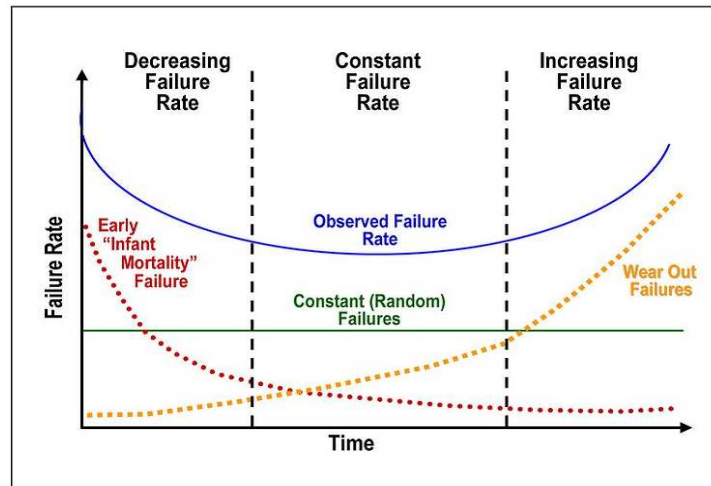


Figura 6.5 – Curva da Banheira
(Fonte: <http://causalcapital.blogspot.pt>)

6.3 TERMODINÂMICA DA DEGRADAÇÃO (TD)

Os modelos de análise de fiabilidade dos equipamentos têm permanecido inalterados há décadas. Bryant et al. (2008), indica que este facto tem levado ao aumento da incapacidade de prever falhas de degradação dos equipamentos actuais, com tecnologias actuais mais avançadas.

Vários autores têm proposto como explicação dos fenómenos de degradação de processos dissipativos que ocorrem no seio dos equipamentos e a previsão de falhas, através da termodinâmica e pela respectiva medição de entropia que surge na dinâmica de degradação dos equipamentos. A medição da entropia como propriedade fundamental de medição da degradação dos sistemas, medindo a desordem, a que a degradação irreversível do sistema está sujeita.

As matérias primas são transformadas em bens com estruturas altamente organizadas, com entropia mínima e elevada energia livre. O envelhecimento e a degradação vão tender para inversão deste “status” termodinâmico; a entropia vai aumentar e a energia livre diminuir, levando os bens a regressarem ao seu estado original em equilíbrio com o meio ambiente.

Os processos degradativos envolvem vários mecanismos com características diferentes: taxas e sequências de mecanismos e processos dissipativos. Todos os tipos de degradação permanente, são processos irreversíveis com geração de entropia. Assim a entropia pode ser utilizada para quantificar o comportamento do processo degradativo.

Dado que a acumulação da degradação é um processo dissipativo, este deve obedecer as leis da termodinâmica (Hansen et Schreyer, 1994) (Bhattacharya et Ellingwood, 1998). De uma forma geral pode-se generalizar que a degradação dos componentes de um equipamento é consequência de processos termodinâmicos irreversíveis que aumentam a desordem (entropia) dos componentes e que a degradação é um fenómeno dependente do tempo com aumento da desordem (Bryant e al., 2008). Isto sugere que a entropia seja uma medida natural da degradação dos bens.

Note-se que um processo dissipativo é um sistema termodinâmico aberto, operando longe do equilíbrio termodinâmico, trocando energia e matéria com a sua vizinhança.

O reconhecimento da relação da entropia com os fenómenos de degradação, tem levado vários autores a estudar a fenomenologia degradativa dos bens pelo paradigma da termodinâmica de degradação e têm tentando por via experimental e dedutiva, a avaliação fundamentada deste fenómeno e à tentativa de sistematização desta nova abordagem do fenómeno de degradação, que tem levado a alguns princípios unificadores.

Alguns desses estudos, relativos à termodinâmica da degradação, são a seguir referenciados:

- Dai et al., 2000, estudaram os fenómenos de atrito à luz das energias termodinâmicas e à termodinâmica de processos dissipativos;
- Bhattacharya et Ellingwood, 1998, estudaram a fadiga de componentes de máquinas;
- Weertman et Weertman, 1964, estudaram a plasticidade e os deslocamentos em componentes em degradação;
- Knot, 1973 e Maugis, 2000, levaram a cabo estudos relativos aos fenómenos de fractura e desgaste;
- Izumietal et al., 1981, Mura, 1987, estudaram o atrito e a corrosão;
- Uhlig et Revie, 1985, estudaram a degradação térmica associada a componentes tribológicos, etc.
- Amiri et al., 2010, desenvolveram um estudo de revisão relativo a sistemas tribológicos através da abordagem termodinâmica, utilizando o conceito de entropia.

- Naderi et al., 2009, estudaram a produção de entropia durante um processo de fadiga em metais, que leva à degradação, alcançando o ponto de fractura do bem (a entropia é uma constante, independente da geometria, carga e frequência).

De acordo com Bryant et al. (2008), a variação da entropia pode ser determinada pela equação da 1ª lei da termodinâmica, bem como conhecendo o trabalho W , o calor e a energia dissipada no sistema que sofre a degradação.

Bryant et al. (2008), desenvolveram um modelo unificador que caracteriza a dinâmica da degradação, utilizando a entropia como medida de desordem, como a principal medida da degradação. Este modelo proposto, liga os componentes de degradação do material e a produção de entropia nos processos dissipativos envolvidos que levam à degradação.

A degradação dos bens é conduzida pela tendência do sistema encontrar, termodinamicamente, o equilíbrio com o meio-ambiente. Trata-se de um processo de envelhecimento e degradação que pode ser avaliado pelo aumento da desordem de estados de energia, decorrente dos processos de degradação.

A entropia permite medir a desordem de um sistema que esteja sujeito a um determinado processo, ao interagir com o meio-ambiente. Com o aumento da entropia, o sistema vai perdendo a capacidade de realizar trabalho útil; a energia do sistema sofre uma degradação e parte torna-se indisponível ou é utilizada de forma deficiente (ex.: uma barra de aço, exposta ao longo do tempo, ao ar, vai sofrer corrosão, perdendo assim resistência e a tensão limite de ruptura, por exemplo, diminui).

É de senso comum que todos os sistemas organizados tendem para uma desordem e degradação natural ao longo do tempo, verificando-se com esta percepção, o aumento dos sistemas que se degradam. Existem duas formas essenciais de determinar a degradação dos sistemas (Feinberg, 2014):

1. Avaliação pela termodinâmica do equilíbrio: neste tipo de avaliação a entropia é utilizada como medida da degradação dos componentes ou sistemas e permitem ainda a avaliação da degradação de sistemas complexos.
2. Avaliação pela termodinâmica do não-equilíbrio: utiliza-se o conceito de trabalho, W , (uma avaliação energética indirecta), para aceder à degradação dos sistemas ou componentes sujeitos a processos cíclicos ou não-cíclicos.

Considerando que um dos propósitos deste trabalho é divulgar dependências entre a energia e exergia e os conceitos de Manutenção nas suas inúmeras vertentes, escolhe-se o método de avaliação, que se propõe em utilizar a termodinâmica do equilíbrio e a entropia, como ferramenta de medida de degradação dos componentes ou sistemas, sujeitos a operação e manutenção.

6.3.1 Trabalho e Energia Livre

Qualquer sistema antes de sofrer envelhecimento detém determinado nível de energia para realizar trabalho. Esta energia é designada por energia livre, ϕ . Esta pode ser definida por:

$$\phi = U - T.S \quad (6.11)$$

onde S é a entropia, T, a temperatura do sistema e U a energia interna.

Considerando que ϕ_i é a energia livre antes do envelhecimento e ϕ_f é a energia livre após o envelhecimento:

$$W = \phi_f - \phi_i \quad (6.12)$$

O sistema está em equilíbrio termodinâmico, quando a energia livre é mínima.

6.3.2 Mecanismos de Envelhecimento

Alguns dos mecanismos de envelhecimento responsáveis pela degradação dos componentes e dos sistemas, são: activação, difusão, forças externas induzidas, etc.

Por outro lado, o envelhecimento depende da taxa de controlo do próprio processo de degradação. Num sistema podem ocorrer a combinação destes mecanismos e a taxas de envelhecimento diferentes. A termodinâmica permite também avaliar o estado do sistema, que expressa o comportamento de outros estados do sistema ou outros sistemas.

As propriedades termodinâmicas são fundamentais para a avaliar a degradação do sistema ou componente, podendo ser: pressão, temperatura, massa, caudal, calor, volume total, etc. (o calor, volume total e a massa, são propriedades extensivas e variam em função da dimensão do sistema, enquanto que a temperatura, a pressão e o caudal são propriedades intensivas, não aditivas e independentes da extensão e quantidade de matéria do sistema).

Aging Mechanism/ Failure Modes	Thermodynamic Variable/Acceleration Stress Factor									
	Type of Aging	Test	Temp	Humidity	Electric Potential	Temp Cycle	Current Density	Static, Dynamic, or Vibration Pressure	Shock Pressure	Corrosion Chemical Potential
Oxidation	D, A	HTL	√							√
Chemical Reactions	A	THB	√	√						√
Fatigue	F	TC, Vib, Shk	√			√		√	√	
Corrosion	A, D, F	THB	√	√	√					√
Fracture	F	Vib, Shk	√	√				√	√	
Wear	F	Mech Cycle	√	√				√	√	
Corrosion Fatigue	A, D, F	THB, Vib	√	√	√	√		√	√	√
Stress Corrosion Cracking	A, D, F	THB, Vib	√	√	√	√		√	√	√
Electromigration	A, D, F	Current Density	√				√			
ESD	F	ESD	√		√					
Dielectric Breakdown	A, F	HV	√		√					

Table Key: Column 2: F = Forced, A = Activated, D = Diffusion

Column 3: HTOL = High-Temperature Operating Life, THB = Temperature-Humidity-Bias, TC = Temperature Cycle, Vib = Vibration, Shk = Shock, HV = High Voltage

Tabela 6.1 – Mecanismos Termodinâmicos de Envelhecimento

(Fonte: Design for Reliability, CRC Press - 2001)

A tabela 6.1 e a figura 6.6 seguinte, permitem aferir a influência de parâmetros termodinâmicos nos mecanismos de falha e a aceleração da degradação destes. A tabela 6.1 não é fechada, mas serve de guia para a categorização de modos e mecanismos de falha. É também relevante a importância de ensaios de fiabilidade de componentes e sistemas, onde os testes permitem aferir os mecanismos e as variáveis que intervêm na falha.

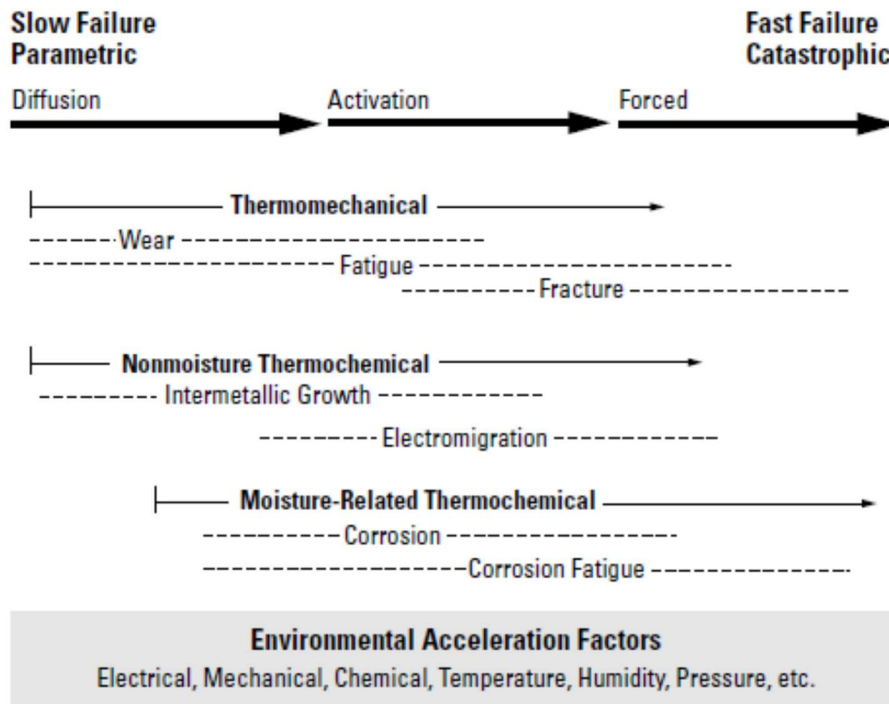


Figura 6.6 – Taxas de envelhecimento e Mecanismos Relacionados
(Fonte: Design for Reliability, CRC Press - 2001)

6.3.3 Entropia de Degradação

A entropia gerada pela degradação de um sistema ou componente, é a “entropia de degradação” (Feinberg et Dana, 2001):

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \Delta S_{device} + \Delta S_{amb} \geq 0 \quad (6.13)$$

S_{gen} – é a entropia gerada;

ΔS_{device} – é a entropia do dispositivo ou sistema;

ΔS_{amb} – é a entropia do meio ambiente.

Temos ainda que em termos de degradação de um componente ou sistema:

$$\Delta S_{device} = \Delta S_{damage} + \Delta S_{non-damage} \geq 0 \quad (6.14)$$

Pode-se considerar que:

- A variação de entropia mede a degradação;
- Nem todo o aumento de entropia causa degradação;
- Desordem está associada à degradação.

6.3.3.1 Medição de Entropia

Concebendo um processo simples, f , com o objectivo de medir a variação de entropia num determinado período de tempo ΔT , considere-se uma medição inicial no tempo t_1 para um componente ou sistema:

$$\Delta S_f(t_1) = S(t_1 + \Delta S) - S(t_1) \quad (6.15)$$

Decorrido algum tempo, com exposição ao envelhecimento, no instante t_2 , ter-se-á ($t_2 \gg t_1$):

$$\Delta S_f(t_2) = S(t_2 + \Delta S) - S(t_2) \quad (6.16)$$

Então a entropia de degradação será:

$$\Delta S_{f-damage}(t_2, t_1) = \Delta S_f(t_2) - \Delta S_f(t_1) \geq 0. \quad (6.17)$$

(Se a equação for igual a zero, não existe degradação).

Pode-se ainda considerar a taxa de envelhecimento ou de degradação, expressa pela seguinte relação (AG – Aging Ratio ou taxa de envelhecimento):

$$AG = \frac{\Delta S_f(t_1)}{\Delta S_f(t_2)} [\%] \quad (6.18)$$

6.3.3.2 Entropia de Degradação de Sistemas Complexos

Se se isolar um sistema, de forma a que não ocorram trocas de calor, massa ou trabalho realizado, com a vizinhança do sistema, a entropia gerada é:

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \sum_{i=1}^N \Delta S_i = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{vizinhança} \geq 0 \quad (6.19)$$

A variação total de entropia de um sistema é a soma das variações de entropia dos seus componentes.

Uma vez estabelecidas algumas equações que relacionam a entropia com a degradação de componentes e a degradação de energia destes. Para cada componente ou sistema, a aplicação da abordagem da TD, obriga ainda à modelação dos mecanismos de degradação presentes, pelo que cada componente deve ser objecto de estudo, dos possíveis modos de falha (com utilização das várias técnicas de análise, como FBA, Brainstorm, Delphi, FTA, FMECA, etc.).

Apresenta-se um exemplo simples, relativo à degradação de uma resistência eléctrica; assim teremos:

$$\Delta S_{damage}(t_2, t_1) = mC_{p-avg} \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) \quad (6.20)$$

A taxa de degradação será:

$$AG = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{T_3}{T_1}\right)} \quad (6.21)$$

Temos que:

- C_{p-avg} é o calor específico médio da resistência eléctrica;
- m é a massa da resistência eléctrica;
- T_2 é a temperatura quando passa a corrente eléctrica I , no instante t_1 ;
- T_3 é a temperatura quando passa a corrente eléctrica I , no instante t_2 (um mês após t_1);
- T_1 é a temperatura inicial da resistência eléctrica.

6.3.4 Exergia, Manutenção e Fiabilidade

Dada a complexidade do equipamento principal da cogeração em estudo, o grupo gerador G3516E, não faz parte do âmbito deste trabalho o estabelecimento de modelos de degradação e envelhecimento de sistemas e componentes do grupo gerador, de forma similar ao exemplo apresentado, devido à imensa complexidade existente e sendo este tipo de exercício um trabalho de equipa.

6.3.4.1 Exergia e Modelos de Degradação

Aplicando as equações relativas à exergia e à geração de entropia, estabelecidas nos pontos 3 e 4 deste trabalho, por substituição directa podemos ter:

$$X_D = T_0 S_{gen} \Leftrightarrow S_{gen} = \Delta S_{irr} = \frac{X_D}{T_0} \quad (6.22)$$

$$\Delta S_{device} = X_D T_0 - \Delta S_{amb} \quad (6.23)$$

Substituindo as equações pelas relações entre entropia e exergia, poder-se-á estar a estabelecer algumas equações que permitam analisar em função da exergia, a degradação dos bens.

Das equações (1.3 a 1.6), temos que os termos de exergia potencial e exergia cinética são iguais às energias potenciais e cinéticas, uma vez que a energia mecânica transforma-se em trabalho. Por outro lado, a exergia física é função da produção de entropia do sistema e esta é a propriedade que fará variar a exergia física mais rapidamente. Também há que assinalar que a exergia química pode ser expressa em função do calor e das temperaturas:

$$X_{ch} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (6.24)$$

De notar que a temperatura é uma propriedade intensiva, pelo que não dependem da extensão do sistema, ao contrário da entropia que é uma propriedade termodinâmica extensiva, tal como o calor. Com a perda de exergia disponível ou a sua destruição, aumenta a geração de entropia no sistema.

Dos quatro termos que compõem a equação geral de exergia o termo da exergia física é o termo que mais poderá contribuir para a análise da degradação de componentes por intermédio da análise termodinâmica, dada a sua relação matemática para a contribuição da exergia, mas fundamentalmente porque é a propriedade termodinâmica que nos relaciona directamente com o fenómeno de degradação e a possibilidade de a calcular de forma resoluta pelos modelos de degradação propostos pelos vários autores que têm estudado a degradação dos componentes directamente pela termodinâmica e não, por exemplo, de forma empírica com a distribuição de Weibull, para aferir a evolução da degradação dos bens ou componentes.

A análise exergética da fiabilidade dos bens, permite a análise de mecanismos que levam à sua degradação, mas também evidenciam que as irreversibilidades não só são inevitáveis de acordo com a nossa experiência física, mas como também destacam as ineficiências de projecto de um equipamento, seu desenvolvimento, bem como as falhas técnicas aplicadas à manutenção do equipamento, que podem necessitar de uma abordagem diferente das equipas de manutenção, etc. (Mandam as boas práticas que as equipas de projecto e de desenvolvimento de um equipamento, tenham engenheiros de manutenção para que o equipamento seja concebido com a melhor manutibilidade possível).

A análise da degradação com o factor energia, sob forma analítica de exergia, permite que a avaliação da degradação de um componente ou sistema na abordagem dos problemas de fiabilidade.

Esta metodologia fornece uma outra visão sobre a causas de falha da fiabilidade, que através das metodologias clássicas não seriam detectáveis e logo não rastreáveis até a ocorrência da falha. É possível a previsão de taxas de degradação e que melhorias podem ser conduzidas para prolongar ou estender o período de vida útil de um componente ou sistema.

Uma das vantagens da introdução da exergia nas equações, advém do facto de que a exergia representa a eficiência mais “honesta” da máquina e não está mascarada pela ausência de irreversibilidades da 1ª lei da termodinâmica, comumente utilizada na indústria para avaliar o rendimento de determinados equipamentos e com impacto económico nos mercados fornecedores desses equipamentos.

Assim a avaliação da degradação dos componentes ou sistemas é expectável que se traduza em resultados mais realistas ou exactos, e consequentemente, a fiabilidade apresentará também valores mais realistas e mais próximos da ocorrência da próxima falha, permitindo por fim, planear toda a cadeia de manutenção de forma mais sustentável e rentável. Ou seja, sendo a exergia uma avaliação mais precisa do trabalho possível que pode ser realizado e a eficiência exérgica uma medida mais adequada ao potencial do equipamento, a introdução de dados mais próximos da realidade, terá a jusante, resultados mais exactos relativamente à fiabilidade dos equipamentos e ao uso da manutenção como rotina essencial à manutenção da indústrias.

Pode-se ainda incorporar, de acordo com as rotinas de manutenção instauradas, algoritmos que permitam uma análise sistemática da exergia dos equipamentos de uma instalação industrial. A exergia poderá ser extrapolada para a análise de fiabilidade e de degradação de acordo com a TD, e ser introduzida na cadeia de manutenção. De acordo com o workflow típico de uma cadeia de manutenção poderíamos ter, nos processos de manutenção a avaliação exérgica do bem a manter:

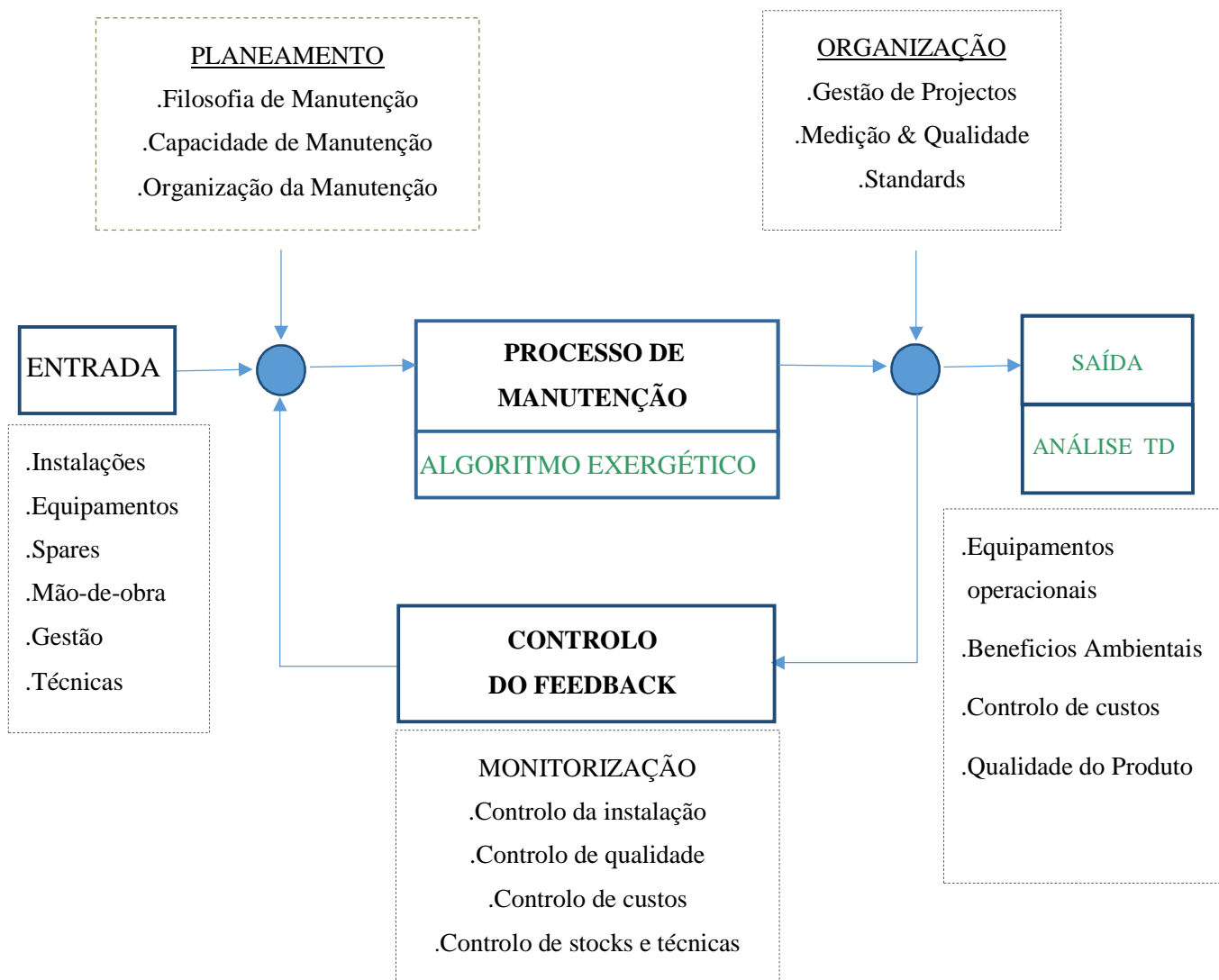


Figura 6.7 - Processo ou Cadeia de Manutenção (Mohamed et al., 2014)

6.3.4.2 Rotina de Manutenção Aplicada ao Grupo Gerador

Na aplicabilidade da manutenção a estas máquinas, grupos geradores Caterpillar®, há por metodologia o emprego de rotinas de manutenção sistemáticas, onde acontecem um conjunto de intervenções programadas ao longo do ciclo de vida do equipamento. No entanto a manutenção preventiva empregue, resume-se basicamente a análises do óleo de lubrificação do motor, onde será possível antecipar uma intervenção não programada em função do resultado dos vários parâmetros do óleo (TBN, sulfatação, metais de contaminação, teor de água, manchas, etc.), análises de oxigénio nos gases de escape para ajuste da relação ar-combustível, análise de pressões e temperaturas no grupo gerador e consequente

interpretação destes valores, que podem indicar por exemplo necessidade de trocar uma vela de uma cabeça do motor.

Existem ferramentas informáticas e procedimentos de análise de instabilidades mecânicas e eléctricas do grupo gerador, bem como para acções de manutenção, após acções de manutenção correctiva. Estas ferramentas e procedimentos são, no entanto, insuficientes para serem encaradas como valências para uma prática de manutenção condicional e de filosofias RCM. Estas valências servem, para essencialmente adequar um conjunto de parâmetros de funcionamento de toda a máquina; por exemplo: as rotações do motor, pressão do óleo de lubrificação, temperatura em diversos pontos do motor e nos enrolamentos do alternador, tempo de ignição, tempo de “cooldown” do motor, percentagem de abertura da válvula de gás do motor (VRG), frequência de Joelho no regulador de tensão, tensão de excitação, intensidade da corrente eléctrica na saída do alternador, etc.

Assim, dentro de uma filosofia de manutenção avançada e sustentável, com base no conceito mais abrangente da gestão lean, a implementação de um algoritmo, com técnicas avançadas de análise termodinâmica, nomeadamente através de análises exergéticas com a aferição de parâmetros do grupo gerador, a avaliação pela termodinâmica da degradação e utilizando um bom interface com o responsável da manutenção, e ainda pela aplicação da fenomenologia dos sistemas dissipativos aos subsistemas do grupo gerador, poder-se-á evoluir para o algoritmo que é apresentado na figura seguinte de forma esquemática. O parâmetro “range” é interpretado como a faixa de medição aceitável, dentro dos limites tidos como aceitáveis para paragem do algoritmo. A determinação deste parâmetro é fundamental para o sucesso de implementação do parâmetro, mas não faz parte deste trabalho a sua determinação. Sugere-se a utilização da estimativa progressiva pela série de Fibonacci, que permite rapidamente estabelecer os limites aceitáveis para a progressão da diminuição do rendimento exergético.

A série de Fibonacci tem um crescimento exponencial e pode fornecer um valor limite para mais rapidamente a análise do crescimento da série, permita uma tomada de decisão mais rápida e acertada (a informação que se obtém dum estimativa cresce mais devagar do que a precisão da estimativa). Com base na teoria da informação, esta série é utilizada em metodologias de gestão, como “Agile Planning Poker”, etc.

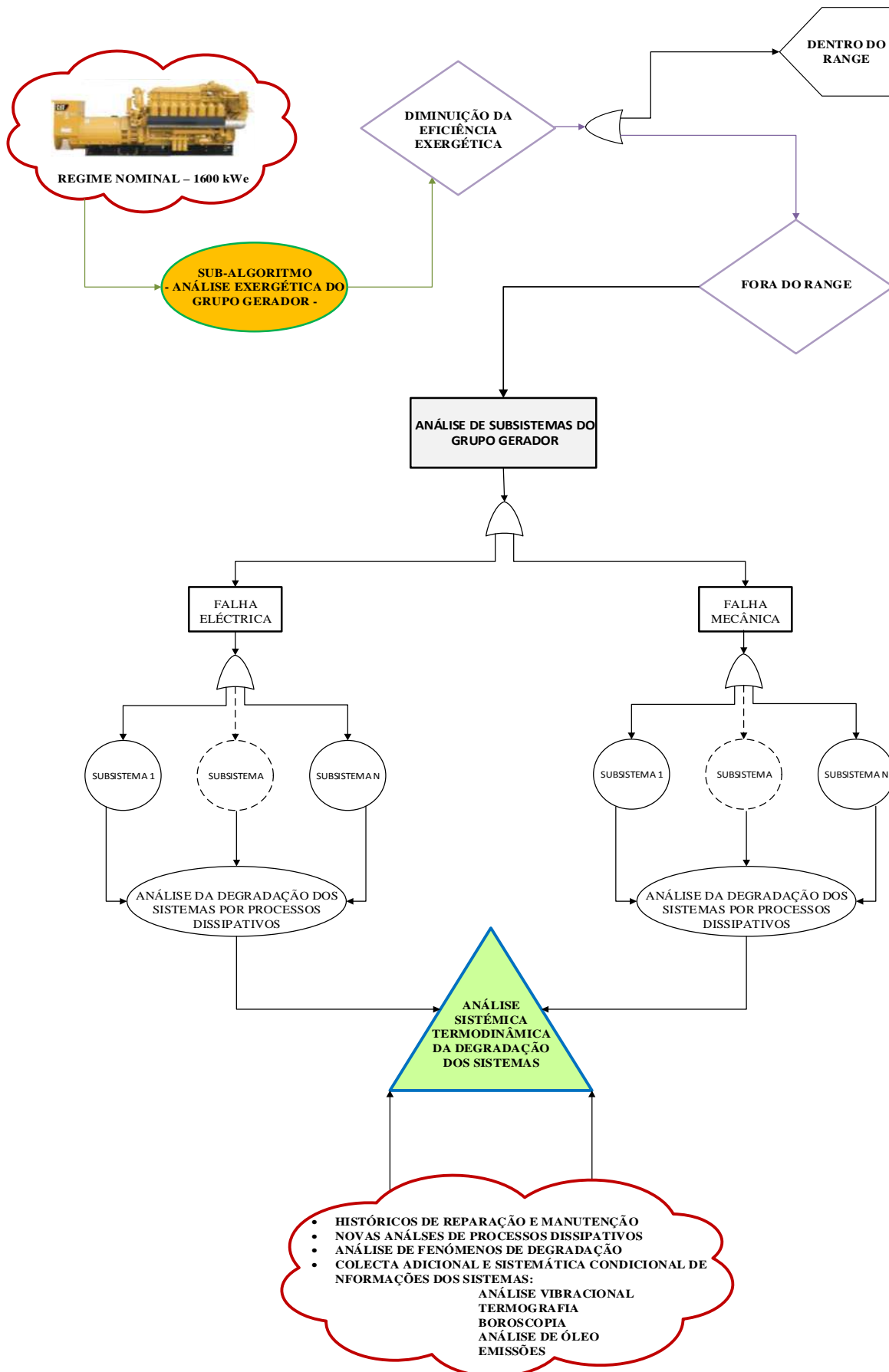


Figura 6.8 – Algoritmo Exergético para Manutenção

- **Exemplo Prático para o Algoritmo**

Considerando um veio de manivelas de um motor alternativo idêntico ao do motor do grupo gerador em estudo, desenvolveu-se uma árvore de falhas, com os primeiros níveis de causa.



Figura 6.9 – Veio de Manivelas

(Fonte: Caterpillar®)

Mais uma vez, considerando que todos os tipos de degradação permanente são irreversíveis, onde a desordem gera entropia e esta aumenta sempre pelo que a utilização desta propriedade termodinâmica, acabe por ser utilizada para quantificar o comportamento da degradação irreversível dos processos de degradação.

Os modelos para previsão precoce de falhas com a caracterização termodinâmica da dinâmica de falhas, que empregam forçosamente a entropia como a medição principal da degradação. Como suporte para a efetivação desta medição, existem vários métodos de medição das variáveis de estado que estão relacionadas com a entropia e que são variáveis implícitas do sistema.

Pode-se observar na árvore de falhas seguinte, as causas de falha, e abordar os aspectos de degradação por fenómenos ligados à tribologia e ligados à fadiga que o veio de manivelas está sujeito, de acordo com a análise da termodinâmica da degradação.

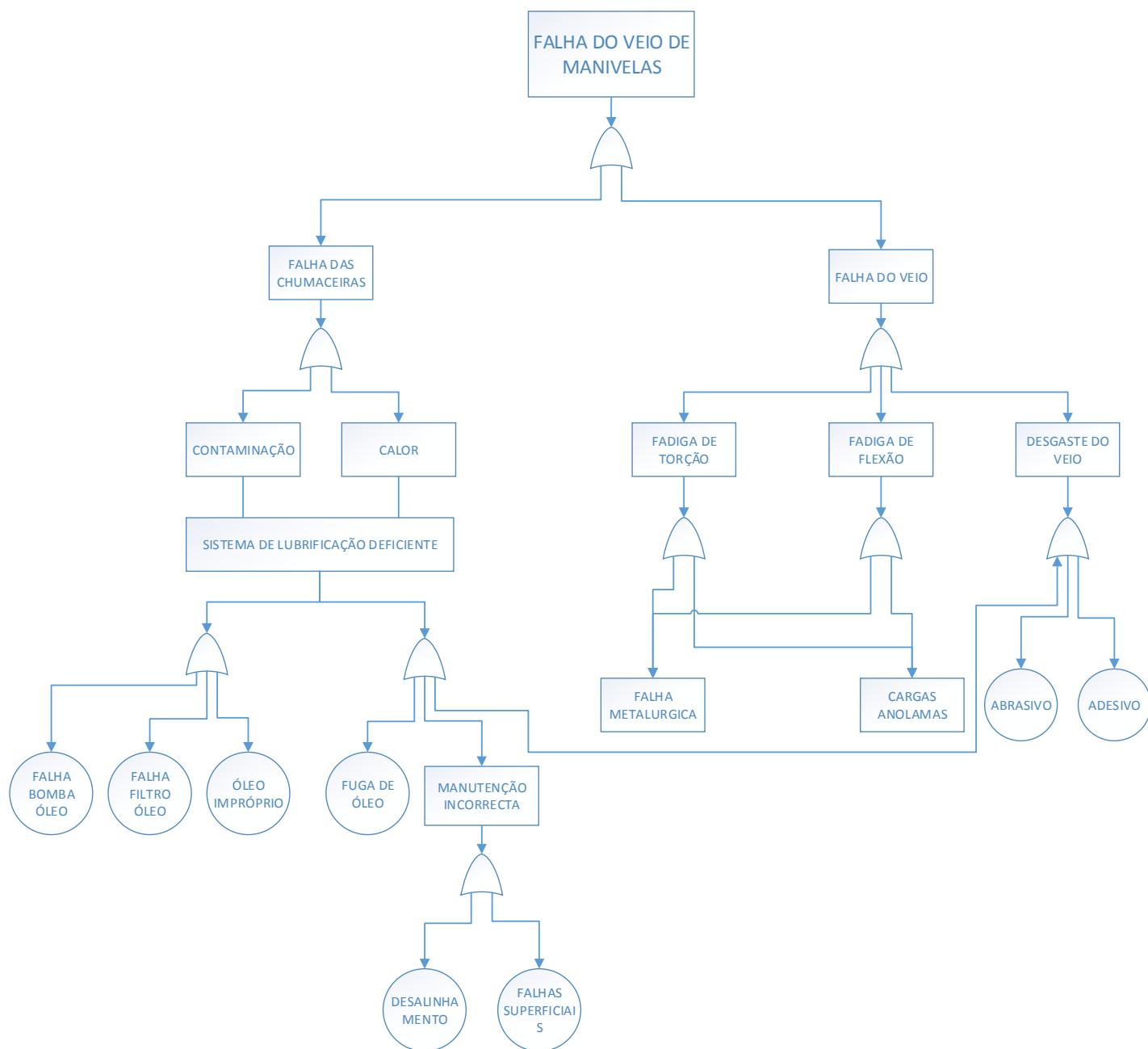


Figura 6.10 – Árvore de Falhas de um Veio de Manivelas (FTA)

Considerado a causa: Falha do Veio/Fadiga de Torção, e a causa: Falha do Veio/Fadiga de Flexão, a falha por fadiga, é uma das principais falhas que ocorrem em elementos estruturais sujeitos a ciclos de carregamentos ao longo do tempo, que pode ser encarada como a acumulação de danos num processo dissipativo que deve estar de acordo com as leis da termodinâmica (Hansen et Schereyer, 1994) (Bhattacharya et Ellingwood, 1998). Doelling et al. (2000), sugere que a entropia é a principal propriedade termodinâmica que oferece a medida natural para a degradação dos componentes.

Para aferir a degradação do veio de manivelas é necessário medir a temperatura da superfície e estimar o coeficiente de convecção (Naderi et Khonsari, 2009). Para tal é usada termografia infravermelha para registrar a evolução da temperatura; deve também ser medida a temperatura ambiente do meio do veio de manivelas por intermédio de um termopar ligado à superfície do veio de manivelas. É expectável que após vários ciclos de fadiga, que a temperatura da superfície do veio de manivelas aumente rapidamente, já que a densidade de energia associada à histerese, provoca a geração de calor por convecção e radiação térmica. Depois a geração de calor equilibra-se com o calor perdido e a temperatura atinge um valor de equilíbrio. Ao fim de determinado número de ciclos a temperatura sobe antes da falha ocorrer.

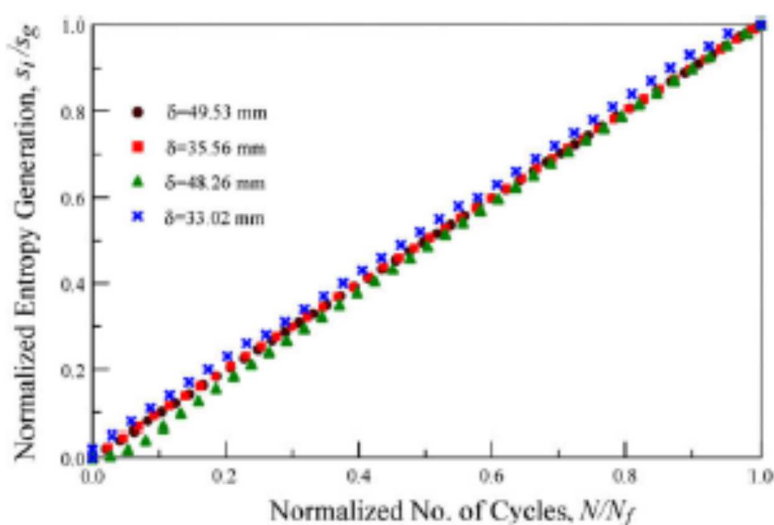


Figura 6.11 – Geração de Entropia e Número de Ciclos para a Fadiga

(Fonte: Naderi et Khonsari, *International Journal and Structures* 47 (2010)875-880)

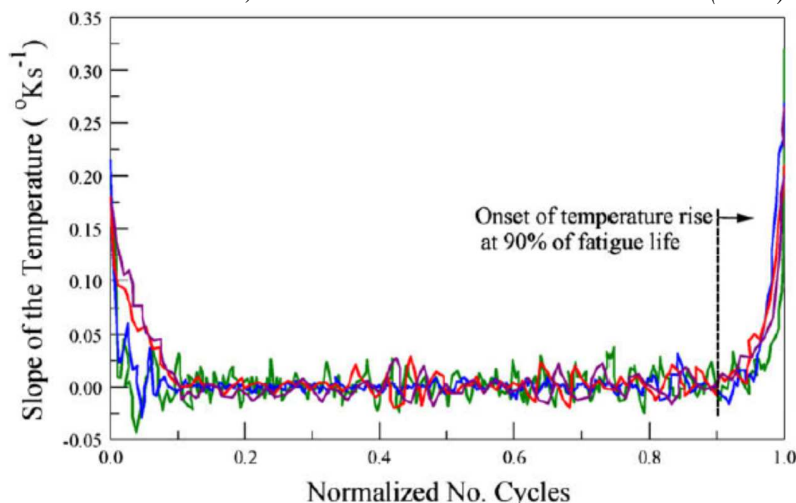


Figura 6.12 – Evolução da Temperatura e Ocorrência da falha

(Fonte: Naderi et Khonsari, *International Journal and Structures* 47 (2010)875-880)

De acordo com o trabalho de Naderi et Khonsari (2009), existe uma relação linear entre a degradação de um material sujeito a fadiga cíclica com a geração de entropia, expressa pela variável D (degradação), função da entropia nos seguintes termos:

$$D = D_0 + \frac{(D_c - D_0)}{\ln\left(1 - \frac{S_{ic}}{S_g}\right)} \times \ln\left(1 - \frac{S_{ic}}{S_g}\right) \quad (6.25)$$

Esta equação demonstra que a entropia pode ser utilizada para avaliar a degradação inerente a um sistema sob fadiga de flexão, torção e compressão-tracção. Da equação (6.24) tem-se que:

- S_g – entropia total gerada;
- D – Parâmetro adicional de degradação;
- D_0 – Parâmetro adicional de degradação inicial;
- S_{ic} – Valor crítico de geração de entropia do aumento de temperatura no início da histerese.

6.4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO

A utilização do conceito da Termodinâmica para analisar e prever a degradação, inicialmente e face ao desenvolvimento actual deste conceito, apenas poderá ser utilizado levando em consideração os seguintes aspectos limitadores:

- a) Inexistência de histórico destes estudos na indústria actual;
- b) Está ainda no seio de publicações técnicas especializadas e de experimentação por um conjunto limitado de investigadores;
- c) Não é aplicável para acções de manutenção correctiva;
- d) Aplicável manutenção sistemática condicional;
- e) Obriga a utilização de equipamentos e técnicas de difícil utilização e operação e dispendiosos – redesenho de muito componentes;
- f) Integração difícil entre programação de algoritmo e captação de parâmetros e sua integração no algoritmo e constante actualização;
- g) Obriga a que a manutenção realizada através deste conceito seja realizada por uma organização bastante evoluída para implementar as técnicas de manutenção requeridas, seja por obrigação contratual, seja para manutenção própria;
- h) Dificuldade em implementar uma filosofia de gestão da manutenção onde as técnicas clássicas são aplicadas com elevada eficiência e constituem a matriz essencial da manutenção praticada.

6.4.1 Estudos para Trabalhos Futuros

Para estudos futuros no tema da Termodinâmica da Degradação, recomendam-se as seguintes incursões neste tema:

- a) Aplicação a um caso concreto de um dos estudos apresentados neste trabalho.
- b) Desenvolver um sistema híbrido entre as várias técnicas de manutenção clássicas e a abordagem da manutenção pela termodinâmica da degradação.
- c) Sistematização na termodinâmica da degradação e integrar numa técnica específica de manutenção de aplicabilidade geral.
- d) Simplificação de alguns conceitos gerais da termodinâmica da degradação para aplicabilidade corrente.
- e) Integrar cenários ambientais e de exploração das matérias-primas nas práticas de manutenção e de utilização racional da energia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1 CITAÇÕES

Torres, E. A. 1999. Avaliação Energética e Termoeconómica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico. FEM/UNICAMP, Tese de Doutorado. Campinas, Brasil.

Moreira, H. L. 2004. Análise Termoeconómica de Sistemas de Refrigeração por Absorção com o Par H₂O-LiBr. CPGEM/VFPB, Tese de Doutorado, João Pessoa, Brasil.

Tsatsaronis, G. 1993. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems.

Kotas, T. J. 1995. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger Publishing Company, Marabar Florida, USA.

Bejan, A., Tsatsaronis, G. et Moran, M. 1996. Thermal Design and Optimization. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

Çengel, Y. A. Et Boles, M. A. 2006. Thermodynamics – An Engineering Approach. McGraw-Hill College, Boston, USA.

Moran, M. J. et Shapiro, H. N. 2006. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons Inc., England.

Bilgen, S. et Kaygusuz, K. 2008. Second Law Analysis of Cogeneration Systems. Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 30(13): 1267-1280.

Holman, J. P. 1988. Thermodynamics. MacGraw-Hill International Editions, Singapore.

Boroumandjazi, G., Saidur, R. et al. 2012. A review on the relation between the energy and exergy efficiencies analysis and the technical characteristic of renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2012) 3131-3135.

Nicholas, G. R. 1971. The Entropy Law & Economic Process, Harvard University Press, Cambridge MA.

Nakićenovic, N. et al. 1996. Regional & Global Exergy Efficiencies, Energy 21.

Wolfgang, N. et Ayres, L. W. 1995. Simulation as a Useful Tool in Examining Waste Production, INSEAD, Fontainebleau, France.

Rosen, MA., Dincer, I. et Kanoglu, M. 2008. Role of Exergy in Increasing Efficiency and Sustainability and Reducing Environmental Impact. *Energy Policy*, 36(1): 128-37.

Ojeda, K., Sánchez, E., Kafarov, V. 2011. Sustainable Ethanol Production from Lignocellulosic Biomass e Application of Exergy Analysis. *Energy* 2011; 36: 2119-28.

Bryant, M. D. et al. 2008. On the Thermodynamics of Degradation. *Proceedings of the Royal Society A*, 2008, 464, (doi: 10.1098/rspa.2007.0371).

Hansen, N. R. et Schreyer, H. L. 1994. A Thermodynamically Consistent Framework for Theories of Elasticity Coupled with Damage. *International Journal of Solids Structures* 31(3): 359-389.

Bhattacharya, B. et Ellingwood, B. 1998. Continuum Damage Mechanics Analysis of Fatigue Crack Initiation. *Int. J. Fatigue* 20, 631-639. (doi: 10.1016/50142-1123(98)00032-2).

Dai, Z., Yang, S. et Xue, Q. 2000. Thermodynamic Model of Fretting Wear. *J. Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut.* 32, 125-131.

Weertman, J. et Weertman, J. R. 1964. Elementary Dislocation Theory. MacMillan, London, UK.

Knot, J. F. 1973. Fundamentals of Fracture Mechanics. Butterworths, London, UK.

Magius, D. 2000. Contact Adhesion, and Fracture of Elastic Solids. Springer, Berlin, Germany.

Izumi, Y. 1981. Energy Considerations in Fracture Crack Propagation. *Int. J. Fract.* 17, 15-25 (doi: 10.10071/BF00043118).

Mura, T. 1987. Micromechanics of Defects in Solids, 2nd edn. Dordrecht, the Netherlands: Martinus Nijhoff.

Uhlig, H. H. et Revie, R. W. 1985. Corrosion and Corrosion Control, pp. 16-20, 3rd edn. Wiley, New York.

Amiri, M. et al. 2010. An Experimental Approach to Evaluate the Critical Damage. In Press, Int. J. Damage Mech. (doi: 10.1177/1056789509343082).

Naderi, M. et al. 2009. On the Thermodynamic Entropy of Fatigue Fracture. Proceedings of the Royal Society A. (doi: 10.1098/rspa.2009.0348).

Feinberg, A. 2014. Thermodynamic Reliability. DFRSOFT (www.dfrsoft.com).

Feinberg, A. et Dana, C. 2001. Design for Reliability, chapter 14: Thermodynamic Reliability Engineering. CRC Press LLC, Florida, USA.

Mohamed, B. D. et al. 2014. Handbook of Maintenance Management and Engineering, pp.3-10. Springer. London, UK.

Doelling, K. L. et al. 2000. An Experimental Study of the Correlation Between Wear and Entropy Flow in Machinery Components. J. Appl. Phys. 5, 2999-3003.

Naderi, M. et Khonsari, M. M. 2009. Experimental Approach to Low-Cycle Fatigue Damage Based on Thermodynamic Entropy. International Journal of Solids and Structures, 47 (2010) 875-880.

7.2 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Pesquisas na Internet, sites: B-on, Google Académico, Wikipedia.

Apontamentos de Termodinâmica I e II do Bacharelato em Eng.^a Mecânica – ISEL, 1991/92.

Artigos Técnicos: www.sciencedirect.com, www.reference-global.com, www.questia.com, <http://www.weibull.com>.

Manuais Técnicos dos Fabricantes: de Grupos Geradores – Caterpillar[®].

Naterer, Greg F. & Camberos, José A. Entropy Based Design and Analysis of Fluids Engineering Systems. Newark – USA: Taylor & Francis Group LCC, 2008. 308p.

Dinçer, Ibrahim & Rosen, Marc A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. USA: Elsevier Science, 2007. 472p.

Helrich, Carl S. Modern Thermodynamics With Statistical Mechanics. USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 402p.

Turner, Wayne C. & Doty, Steve. Energy Management Handbook, 6th Edition. New York – USA: Taylor & Francis Group, 2006. 924p.

Ganapathy, V. Steam Plant Calculations Manual 2nd Edition. Columbus, Ohio – USA: Marcel Dekker, Inc., 1994. 423p.

Woodruff, Everett & Lammers, Herbert & Lammers, Thomas. Steam Plant Operation 8th Edition. USA: McGraw-Hill Professional, 2004. 850p.

Annamalai, Kalwan & Puri, Ishwar k. Advanced Thermodynamics Engineering. New York: CRC Press, 2002. 801p.

Kehlhofer, Rolf. Combined Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants. Oklahoma: Pennwell Publishing Company, 1997. 388p.

Dugdale, J. S. Entropy and it's Physical Meaning. Great Britain: Taylor & Francis, Ltd., 1996. 193p.

Kreith, Frank. The CRC Handbook of Thermal Engineering. USA: CRC Press LLC, 2000. 1143p.

Moran, Michael J. & Shapiro, Howard N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th Edition. Great Britain: John Wiley & Sons Inc., 2006. 847p.

Thumann, Albert & Mehta, D. Paul. Handbook of Energy Engineering, 5th Edition. Lilburn – USA: Fairmont Press, Inc., 2001. 485p.

Veverka, V. V. & Madron, F. Material and Energy Balancing in the Process Industries – From Microscopic Balances to Large Plants. Netherlands: Elsevier Science B.V., 1997. 649p.

Kleidon, Axel & Lorenz, Ralph D. Non-Equilibrium Thermodynamics and Production of Entropy. Germany: Springer-Verlag, 2005. 268p.

Callen, B. Hernert. Thermodynamics and an Introductory Thermostatistics, 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1985. 511p.

Linder, Bruno. Thermodynamics and Introductory Statistical Mechanics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 219p.

JØrgensen, Sven Erik & Svirezhev, Yuri M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Netherlands: Elsevier B.V., 2004. 381p.

Moran, Michael J. & Shapiro, Howard N. & Munson, Bruce R. & Dewitt, Introduction to Thermal Systems Engineering. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 562p.

Kreith, Frank. The CRC Handbook of Thermal Engineering. USA: CRC Press LLC, 2000. 1183p.

Petchers, Neil. Combined Heating, Cooling & Power Handbook: Technologies & Applications. New York: Fairmont Press, Inc., 2003. 459p.

Potter, Merle C. & Somerton, Craig W. Thermodynamics for Engineers. New York: Schaum's Outline Series – McGraw-Hill, 1993. 386p.

Green, M. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 161p.

Cápek, Vladislav & Sheehan, Daniel P. Challenges to the Second Law of Thermodynamics. Netherlands: Springer, 2005. 372p.

Logan, Earl Jr. Thermodynamics – Processes and Applications. Switzerland: Marcel Dekker, Inc, 1999. 441p.

Saridis, George N. Entropy in Control Engineering. USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001. 148p.

- Masters, Gilbert M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 677p.
- Kjelstrup, Signe & Bedeaux, Dick. Non Equilibrium Thermodynamics of Heterogeneous Systems. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. 451p.
- Turns, Stephen R. & Kraige, David R. Property Tables for Thermal Fluids Engineering. USA: Cambridge University Press, 2007. 231p.
- Kondepudi, Dilip & Prigogine, Ilya. Modern Thermodynamics. Great Britain: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 506p.
- Lim, Yung-Kuo. Problems and Solutions on Thermodynamics and Statistical Mechanics. Singapore: World Scientific Co. Pte. Ltd., 1990. 431p.
- Thoma, Jean & Mocellin, Gianni. Simulation With Entropy in Engineering Thermodynamics – Understanding Matter and Systems with Bondgraphs. Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 143p.
- Winterbone, Desmond. E. Advanced Thermodynamics for Engineers. Woburn-USA: Butterworth-Heinemann, 2002. 399p.
- Ter-Gazarian, A. Energy Storage for Power Systems. Great Britain: Peter Peregrinus Ltd., 1994. 232p.
- Sørensen, Bent. Energy – Conversion Transmission and Storage. USA: Academic Press, 2007. 323p.
- Horlock, J. H. Advanced Gas Turbine Cycles. Netherlands: Elsevier Science, Ltd., 2003. 230p.
- Firoozabadi, Abbas. Thermodynamics of Hydrocarbon Reservoirs. USA: McGraw-Hill Companies, Inc., 1999. 353p.
- Ross, John. Thermodynamics and fluctuations far from Equilibrium. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 204p.
- Schmitz, John E. J. The Second Law of Life. USA: William Andrew Publishing Inc., 2006. 229p.

- Wu, Chih. Thermodynamics and Heat Powered Cycles: A Cognitive Engineering Approach. New York – USA: Nova Science Publishers, Inc., 2007. 677p.
- Demirel, Yasar. Nonequilibrium Thermodynamics 2nd Edition. Netherlands: Elsevier B. V., 2007. 734p.
- Öttinger, Hans Christian. Beyond Equilibrium Thermodynamics. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 635p.
- Yang, Guangbin. Life Cycle Reliability Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 529p.
- Nakagawa, Toshio. Advanced Reliability Models and Maintenance Politics. Japão: Springer-Verlag London Ltd., 2008. 251p.
- Ching, Wai-ki & Michael K. Ng. Markov Chains – Models, Algorithms and Applications. USA: Springer-Verlag London Ltd., 2006. 212p.
- Wang, Hongzhou & Pham, Hoang. Reliability and Optimal Maintenance. Alemanha: Springer-Verlag London Ltd., 2006. 352p.
- Birolini, Alessandro. Reliability Engineering – Theory and Practice 5th Edition. Alemanha: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 588p.
- Billinton, Roy & Allan, N. Ronald. Reliability Evaluation of Power Systems 2nd Edition. New York: Plenum Press Publishing Corporation, 1996. 534p.
- Bergman, Bo et DeMaré, Jacques et Lorén, Sara et Svensson, Thomas. Robust Design Methodology for Reliability. UK: Jhon Wiley & Sons, Ltd., 2009. 215p.
- Gnedenko, Igor & Ushakov, A, Igor. Probabilistic Reliability Engineering. Wiley-Interscience, 2004. 517p.
- Rausand, Marvin et Hoyland, Arnljot. System Reliability Theory – Models, Statistical Methods, and Applications. Wiley-Interscience, 2003. 664p.
- Kolowrocki, Krzysztof. Reliability of Large Systems. Elsevier Science, 2004. 358p.
- Smith, J. David. Reliability, Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers. Butterworth-Heinemann, 1997. 319p.
- Lewis, E. E. Introduction to Reliability Engineering 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2001, 464p.

Lawler, F. Gregory. Introduction to Stochastic Processes. Chapman & Hall/CRC, 1995, 192p.

Dhillon, B. S. Engineering Maintenance A Modern Approach. CRC, 2002. 240p.

Smith, M Anthony et Hinchcliffe, R. Glenn. RCM – Gateway to World Class Maintenance.

UK: Elsevier-Butterworth, 2004. 361p.

9 ANEXO II – TABELA REN – GÁS NATURAL

Do ficheiro Excel, do site da REN: “Características de GN_Cts12808_Junho 2016”

	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines	CTS 12808 - TGNL Sines
	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	C1 %Mol	C2 %Mol	C3 %Mol	i-C4 %Mol	n-C4 %Mol	i-C5 %Mol	n-C5 %Mol	C6+ %Mol	N2 %Mol	CO2 %Mol	I. Wobbe kWh/m3(n)	d. relativa	d. normal kg/m3	PCI kWh/m3(n)	PCS kWh/m3(n)
01-jun-16	93,9069	5,3130	0,5573	0,0626	0,0487	0,0054	0,0029	0,0000	0,1034	0,0000	15,1482	0,5885	0,7609	10,4910	11,6209
02-jun-16	93,1415	5,0437	1,1694	0,1827	0,3420	0,0031	0,0018	0,0000	0,1154	0,0000	15,0550	0,5554	0,7181	10,5318	11,7458
03-jun-16	92,8732	5,2142	1,1502	0,1777	0,4951	0,0035	0,0012	0,0000	0,0849	0,0000	15,1181	0,5602	0,7243	10,5875	11,7922
04-jun-16	92,9316	5,1470	1,1399	0,1760	0,5078	0,0070	0,0003	0,0000	0,0907	0,0000	15,0842	0,5507	0,7120	10,5623	11,7806
05-jun-16	92,9101	5,1606	1,1431	0,1766	0,5123	0,0080	0,0000	0,0000	0,0892	0,0000	15,2190	0,5837	0,7547	10,6720	11,8463
06-jun-16	92,9101	5,1606	1,1431	0,1766	0,5123	0,0080	0,0000	0,0000	0,0892	0,0000	15,2822	0,6018	0,7781	10,7103	11,8561
07-jun-16	92,9101	5,1606	1,1431	0,1766	0,5123	0,0080	0,0000	0,0000	0,0892	0,0000	15,2332	0,5862	0,7579	10,6846	11,8563
08-jun-16	92,9101	5,1606	1,1431	0,1766	0,5123	0,0080	0,0000	0,0000	0,0892	0,0000	15,3032	0,6036	0,7804	10,7415	11,8896
09-jun-16	92,9101	5,1606	1,1431	0,1766	0,5123	0,0080	0,0000	0,0000	0,0892	0,0000	15,2818	0,5998	0,7755	10,7151	11,8656
10-jun-16	92,8569	5,3532	1,1393	0,1703	0,4078	0,0061	0,0013	0,0000	0,0653	0,0000	15,2531	0,5948	0,7690	10,6817	11,8359
11-jun-16	93,1105	5,2831	1,0979	0,1626	0,2715	0,0052	0,0020	0,0000	0,0674	0,0000	15,2462	0,5982	0,7734	10,6504	11,7920
12-jun-16	93,0344	5,3072	1,1034	0,1619	0,3228	0,0048	0,0025	0,0000	0,0632	0,0000	15,2557	0,5991	0,7746	10,6657	11,8083
13-jun-16	92,9437	5,3393	1,1181	0,1634	0,3692	0,0045	0,0020	0,0000	0,0598	0,0000	15,2653	0,6001	0,7759	10,6817	11,8254
14-jun-16	92,8564	5,3580	1,1249	0,1667	0,4223	0,0043	0,0019	0,0000	0,0653	0,0000	15,2731	0,6011	0,7771	10,6962	11,8410
15-jun-16	92,8871	5,5319	1,1784	0,1745	0,1760	0,0044	0,0024	0,0000	0,0458	0,0000	15,2579	0,5989	0,7743	10,6652	11,8078
16-jun-16	92,6959	5,6157	1,1906	0,1757	0,2743	0,0048	0,0021	0,0000	0,0407	0,0000	15,2769	0,6008	0,7768	10,6966	11,8415
17-jun-16	92,8426	5,4447	1,1697	0,1735	0,3144	0,0045	0,0020	0,0000	0,0484	0,0000	15,2712	0,6004	0,7763	10,6889	11,8332
18-jun-16	92,8457	5,4878	1,1768	0,1739	0,2657	0,0046	0,0026	0,0000	0,0428	0,0000	15,2685	0,6000	0,7757	10,6827	11,8267
19-jun-16	92,8638	5,5056	1,1786	0,1754	0,2323	0,0045	0,0017	0,0000	0,0382	0,0000	15,2659	0,5996	0,7752	10,6772	11,8207
20-jun-16	92,8483	5,4791	1,1877	0,1779	0,2578	0,0038	0,0023	0,0000	0,0430	0,0000	15,2681	0,5999	0,7757	10,6820	11,8258
21-jun-16	92,5498	5,4964	1,3494	0,2092	0,3458	0,0044	0,0018	0,0000	0,0428	0,0000	15,2997	0,6034	0,7801	10,7367	11,8845
22-jun-16	92,3270	5,2669	1,5836	0,2579	0,5150	0,0047	0,0019	0,0000	0,0429	0,0000	15,3397	0,6078	0,7858	10,8059	11,9586
23-jun-16	92,4928	5,2200	1,5297	0,2490	0,4561	0,0051	0,0015	0,0000	0,0458	0,0000	15,3230	0,6060	0,7835	10,7778	11,9285
24-jun-16	92,5250	5,1765	1,5125	0,2448	0,4886	0,0042	0,0023	0,0000	0,0466	0,0000	15,3231	0,6060	0,7836	10,7781	11,9288
25-jun-16	92,8120	5,0171	1,4986	0,2442	0,3697	0,0049	0,0019	0,0000	0,0517	0,0000	15,2973	0,6034	0,7802	10,7349	11,8825
26-jun-16	92,6170	5,0989	1,5315	0,2516	0,4508	0,0048	0,0017	0,0000	0,0437	0,0000	15,3176	0,6053	0,7827	10,7681	11,9181
27-jun-16	92,6380	5,0790	1,4968	0,2436	0,4889	0,0052	0,0017	0,0000	0,0467	0,0000	15,3170	0,6054	0,7828	10,7679	11,9179
28-jun-16	92,6799	5,0625	1,5084	0,2462	0,4396	0,0059	0,0017	0,0000	0,0558	0,0000	15,3095	0,6048	0,7820	10,7570	11,9061
29-jun-16	92,9002	5,0982	1,4996	0,2455	0,2013	0,0050	0,0023	0,0000	0,0481	0,0000	15,2796	0,6014	0,7775	10,7035	11,8489
30-jun-16	92,8109	5,0876	1,5061	0,2449	0,2969	0,0053	0,0020	0,0000	0,0461	0,0000	15,2928	0,6027	0,7793	10,7260	11,8730
Média	92,8514	5,2610	1,2471	0,1932	0,3774	0,0053	0,0016	0,0000	0,0630	0,0000	15,2575	0,5956	0,7701	10,6907	11,8453
Máximo	93,9069	5,6157	1,5836	0,2579	0,5150	0,0080	0,0029	0,0000	0,1154	0,0000	15,3397	0,6078	0,7858	10,8059	11,9586
Mínimo	92,3270	5,0171	0,5573	0,0626	0,0487	0,0031	0,0000	0,0000	0,0382	0,0000	15,0550	0,5507	0,7120	10,4910	11,6209

10 ANEXO III – TABELAS E ELEMENTOS DE TERMODINÂMICA

Tabelas de Çengel et Boles

TABLE A –1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg·K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/kg·K is equivalent to kPa·m³/kg·K. The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.31447$ kJ/kmol·K and M is the molar mass.

Source: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; and ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(a) At 300 K

Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg·K	c_p kJ/kg·K	c_v kJ/kg·K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C ₄ H ₁₀	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO ₂	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C ₂ H ₆	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C ₂ H ₄	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H ₂	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH ₄	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N ₂	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C ₈ H ₁₈	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O ₂	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C ₃ H ₈	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H ₂ O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Note: The unit kJ/kg·K is equivalent to kJ/kg·°C.

Source: *Chemical and Process Thermodynamics 3/E* by Kyle, B. G., © 2000. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $kJ/kg\cdot K$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Source: Tables A-4 through A-8 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the highly accurate Steam_IAPWS, which incorporates the 1995 Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, Issued by The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). This formulation replaces the 1984 formulation of Haar, Gallagher, and Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), which is also available in EES as the routine STEAM. The new formulation is based on the correlations of Saul and Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) with modifications to adjust to the International Temperature Scale of 1990. The modifications are described by Wagner and Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). The properties of ice are based on Hyland and Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K," ASHRAE Trans., Part 2A, Paper 2793, 1983.

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, <i>m</i> ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table (Concluded)

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

TABLE A-6

Superheated water

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*				<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)				
Sat. [†]	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741					1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429				
<i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C)				<i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C)				<i>P</i> = 0.40 MPa (143.61°C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
<i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C)				<i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C)				<i>P</i> = 0.80 MPa (170.41°C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

† Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A-6

Superheated water (Concluded)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88°C)				<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96°C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04°C)				
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37°C)				<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11°C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38°C)				
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95°C)				<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85°C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56°C)				
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.12455	3205.5	3582.8	7.3813	0.11325	3202.5	3578.9	7.3157
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349								

TABLE A-6

Superheated water (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 4.0 MPa (250.35°C)				<i>P</i> = 4.5 MPa (257.44°C)				<i>P</i> = 5.0 MPa (263.94°C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
<i>P</i> = 6.0 MPa (275.59°C)				<i>P</i> = 7.0 MPa (285.83°C)				<i>P</i> = 8.0 MPa (295.01°C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
<i>P</i> = 9.0 MPa (303.35°C)				<i>P</i> = 10.0 MPa (311.00°C)				<i>P</i> = 12.5 MPa (327.81°C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874				

TABLE A-6

Superheated water (Concluded)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 15.0 MPa (342.16°C)				<i>P</i> = 17.5 MPa (354.67°C)				<i>P</i> = 20.0 MPa (365.75°C)				
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574
<i>P</i> = 25.0 MPa				<i>P</i> = 30.0 MPa				<i>P</i> = 35.0 MPa				
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.0	4270.6	6.9853
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841
<i>P</i> = 40.0 MPa				<i>P</i> = 50.0 MPa				<i>P</i> = 60.0 MPa				
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1745.2	1843.2	3.9317
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2160.3	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.0	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>s^o</i> kJ/kg·K	<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>s^o</i> kJ/kg·K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

TABLE A-17Ideal-gas properties of air (*Concluded*)

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>s^o</i> kJ/kg-K	<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>s^o</i> kJ/kg-K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties *P_r* (relative pressure) and *v_r* (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785-86, table A-5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).

TABLE A-18

Ideal-gas properties of nitrogen, N₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	a kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	a kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

TABLE A-18

 Ideal-gas properties of nitrogen, N_2 (Concluded)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,378	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799
1480	46,377	34,071	241.301	2600	86,650	65,033	261.512
1500	47,073	34,601	241.768	2650	88,488	66,455	262.213
1520	47,771	35,133	242.228	2700	90,328	67,880	262.902
1540	48,470	35,665	242.685	2750	92,171	69,306	263.577
1560	49,168	36,197	243.137	2800	94,014	70,734	264.241
1580	49,869	36,732	243.585	2850	95,859	72,163	264.895
1600	50,571	37,268	244.028	2900	97,705	73,593	265.538
1620	51,275	37,806	244.464	2950	99,556	75,028	266.170
1640	51,980	38,344	244.896	3000	101,407	76,464	266.793
1660	52,686	38,884	245.324	3050	103,260	77,902	267.404
1680	53,393	39,424	245.747	3100	105,115	79,341	268.007
1700	54,099	39,965	246.166	3150	106,972	80,782	268.601
1720	54,807	40,507	246.580	3200	108,830	82,224	269.186
1740	55,516	41,049	246.990	3250	110,690	83,668	269.763

Source: Tables A-18 through A-25 are adapted from Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 787-98. Originally published in JANAF, *Thermochemical Tables*, NSRDS-NBS-37, 1971.

TABLE A-19

 Ideal-gas properties of oxygen, O₂

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	<i>u</i> kJ/kmol	ξ° kJ/kmol-K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	<i>u</i> kJ/kmol	ξ° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,525	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	242.120

TABLE A-19

 Ideal-gas properties of oxygen, O_2 (Concluded)

T K	\bar{h} kJ/kmol	u kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	u kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
1000	31,389	23,075	243.471	1760	58,880	44,247	263.861
1020	32,088	23,607	244.164	1780	59,624	44,825	264.283
1040	32,789	24,142	244.844	1800	60,371	45,405	264.701
1060	33,490	24,677	245.513	1820	61,118	45,986	265.113
1080	34,194	25,214	246.171	1840	61,866	46,568	265.521
1100	34,899	25,753	246.818	1860	62,616	47,151	265.925
1120	35,606	26,294	247.454	1880	63,365	47,734	266.326
1140	36,314	26,836	248.081	1900	64,116	48,319	266.722
1160	37,023	27,379	248.698	1920	64,868	48,904	267.115
1180	37,734	27,923	249.307	1940	65,620	49,490	267.505
1200	38,447	28,469	249.906	1960	66,374	50,078	267.891
1220	39,162	29,018	250.497	1980	67,127	50,665	268.275
1240	39,877	29,568	251.079	2000	67,881	51,253	268.655
1260	40,594	30,118	251.653	2050	69,772	52,727	269.588
1280	41,312	30,670	252.219	2100	71,668	54,208	270.504
1300	42,033	31,224	252.776	2150	73,573	55,697	271.399
1320	42,753	31,778	253.325	2200	75,484	57,192	272.278
1340	43,475	32,334	253.868	2250	77,397	58,690	273.136
1360	44,198	32,891	254.404	2300	79,316	60,193	273.891
1380	44,923	33,449	254.932	2350	81,243	61,704	274.809
1400	45,648	34,008	255.454	2400	83,174	63,219	275.625
1420	46,374	34,567	255.968	2450	85,112	64,742	276.424
1440	47,102	35,129	256.475	2500	87,057	66,271	277.207
1460	47,831	35,692	256.978	2550	89,004	67,802	277.979
1480	48,561	36,256	257.474	2600	90,956	69,339	278.738
1500	49,292	36,821	257.965	2650	92,916	70,883	279.485
1520	50,024	37,387	258.450	2700	94,881	72,433	280.219
1540	50,756	37,952	258.928	2750	96,852	73,987	280.942
1560	51,490	38,520	259.402	2800	98,826	75,546	281.654
1580	52,224	39,088	259.870	2850	100,808	77,112	282.357
1600	52,961	39,658	260.333	2900	102,793	78,682	283.048
1620	53,696	40,227	260.791	2950	104,785	80,258	283.728
1640	54,434	40,799	261.242	3000	106,780	81,837	284.399
1660	55,172	41,370	261.690	3050	108,778	83,419	285.060
1680	55,912	41,944	262.132	3100	110,784	85,009	285.713
1700	56,652	42,517	262.571	3150	112,795	86,601	286.355
1720	57,394	43,093	263.005	3200	114,809	88,203	286.989
1740	58,136	43,669	263.435	3250	116,827	89,804	287.614

TABLE A-20

Ideal-gas properties of carbon dioxide, CO₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	u kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	u kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,522	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

TABLE A-20

 Ideal-gas properties of carbon dioxide, CO₂ (Concluded)

T K	\bar{h} kJ/kmol	a kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	a kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
1000	42,769	34,455	269.215	1760	86,420	71,787	301.543
1020	43,859	35,378	270.293	1780	87,612	72,812	302.217
1040	44,953	36,306	271.354	1800	88,806	73,840	302.884
1060	46,051	37,238	272.400	1820	90,000	74,868	303.544
1080	47,153	38,174	273.430	1840	91,196	75,897	304.198
1100	48,258	39,112	274.445	1860	92,394	76,929	304.845
1120	49,369	40,057	275.444	1880	93,593	77,962	305.487
1140	50,484	41,006	276.430	1900	94,793	78,996	306.122
1160	51,602	41,957	277.403	1920	95,995	80,031	306.751
1180	52,724	42,913	278.361	1940	97,197	81,067	307.374
1200	53,848	43,871	297.307	1960	98,401	82,105	307.992
1220	54,977	44,834	280.238	1980	99,606	83,144	308.604
1240	56,108	45,799	281.158	2000	100,804	84,185	309.210
1260	57,244	46,768	282.066	2050	103,835	86,791	310.701
1280	58,381	47,739	282.962	2100	106,864	89,404	312.160
1300	59,522	48,713	283.847	2150	109,898	92,023	313.589
1320	60,666	49,691	284.722	2200	112,939	94,648	314.988
1340	61,813	50,672	285.586	2250	115,984	97,277	316.356
1360	62,963	51,656	286.439	2300	119,035	99,912	317.695
1380	64,116	52,643	287.283	2350	122,091	102,552	319.011
1400	65,271	53,631	288.106	2400	125,152	105,197	320.302
1420	66,427	54,621	288.934	2450	128,219	107,849	321.566
1440	67,586	55,614	289.743	2500	131,290	110,504	322.808
1460	68,748	56,609	290.542	2550	134,368	113,166	324.026
1480	66,911	57,606	291.333	2600	137,449	115,832	325.222
1500	71,078	58,606	292.114	2650	140,533	118,500	326.396
1520	72,246	59,609	292.888	2700	143,620	121,172	327.549
1540	73,417	60,613	292.654	2750	146,713	123,849	328.684
1560	74,590	61,620	294.411	2800	149,808	126,528	329.800
1580	76,767	62,630	295.161	2850	152,908	129,212	330.896
1600	76,944	63,741	295.901	2900	156,009	131,898	331.975
1620	78,123	64,653	296.632	2950	159,117	134,589	333.037
1640	79,303	65,668	297.356	3000	162,226	137,283	334.084
1660	80,486	66,592	298.072	3050	165,341	139,982	335.114
1680	81,670	67,702	298.781	3100	168,456	142,681	336.126
1700	82,856	68,721	299.482	3150	171,576	145,385	337.124
1720	84,043	69,742	300.177	3200	174,695	148,089	338.109
1740	85,231	70,764	300.863	3250	177,822	150,801	339.069

TABLE A-23

Ideal-gas properties of water vapor, H₂O

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13,014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

TABLE A-23

 Ideal-gas properties of water vapor, H₂O (Continued)

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	s° kJ/kmol-K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	s° kJ/kmol-K
1000	35,882	27,568	232.597	1760	70,535	55,902	258.151
1020	36,709	28,228	233.415	1780	71,523	56,723	258.708
1040	37,542	28,895	234.223	1800	72,513	57,547	259.262
1060	38,380	29,567	235.020	1820	73,507	58,375	259.811
1080	39,223	30,243	235.806	1840	74,506	59,207	260.357
1100	40,071	30,925	236.584	1860	75,506	60,042	260.898
1120	40,923	31,611	237.352	1880	76,511	60,880	261.436
1140	41,780	32,301	238.110	1900	77,517	61,720	261.969
1160	42,642	32,997	238.859	1920	78,527	62,564	262.497
1180	43,509	33,698	239.600	1940	79,540	63,411	263.022
1200	44,380	34,403	240.333	1960	80,555	64,259	263.542
1220	45,256	35,112	241.057	1980	81,573	65,111	264.059
1240	46,137	35,827	241.773	2000	82,593	65,965	264.571
1260	47,022	36,546	242.482	2050	85,156	68,111	265.838
1280	47,912	37,270	243.183	2100	87,735	70,275	267.081
1300	48,807	38,000	243.877	2150	90,330	72,454	268.301
1320	49,707	38,732	244.564	2200	92,940	74,649	269.500
1340	50,612	39,470	245.243	2250	95,562	76,855	270.679
1360	51,521	40,213	245.915	2300	98,199	79,076	271.839
1380	52,434	40,960	246.582	2350	100,846	81,308	272.978
1400	53,351	41,711	247.241	2400	103,508	83,553	274.098
1420	54,273	42,466	247.895	2450	106,183	85,811	275.201
1440	55,198	43,226	248.543	2500	108,868	88,082	276.286
1460	56,128	43,989	249.185	2550	111,565	90,364	277.354
1480	57,062	44,756	249.820	2600	114,273	92,656	278.407
1500	57,999	45,528	250.450	2650	116,991	94,958	279.441
1520	58,942	46,304	251.074	2700	119,717	97,269	280.462
1540	59,888	47,084	251.693	2750	122,453	99,588	281.464
1560	60,838	47,868	252.305	2800	125,198	101,917	282.453
1580	61,792	48,655	252.912	2850	127,952	104,256	283.429
1600	62,748	49,445	253.513	2900	130,717	106,605	284.390
1620	63,709	50,240	254.111	2950	133,486	108,959	285.338
1640	64,675	51,039	254.703	3000	136,264	111,321	286.273
1660	65,643	51,841	255.290	3050	139,051	113,692	287.194
1680	66,614	52,646	255.873	3100	141,846	116,072	288.102
1700	67,589	53,455	256.450	3150	144,648	118,458	288.999
1720	68,567	54,267	257.022	3200	147,457	120,851	289.884
1740	69,550	55,083	257.589	3250	150,272	123,250	290.756

TABLE A-26

Enthalpy of formation, Gibbs function of formation, and absolute entropy at 25°C, 1 atm

Substance	Formula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
Carbon	C(s)	0	0	5.74
Hydrogen	H ₂ (g)	0	0	130.68
Nitrogen	N ₂ (g)	0	0	191.61
Oxygen	O ₂ (g)	0	0	205.04
Carbon monoxide	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	-393,520	-394,360	213.80
Water vapor	H ₂ O(g)	-241,820	-228,590	188.83
Water	H ₂ O(l)	-285,830	-237,180	69.92
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂ (g)	-136,310	-105,600	232.63
Ammonia	NH ₃ (g)	-46,190	-16,590	192.33
Methane	CH ₄ (g)	-74,850	-50,790	186.16
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	+226,730	+209,170	200.85
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	+52,280	+68,120	219.83
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	-84,680	-32,890	229.49
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	+20,410	+62,720	266.94
Propane	C ₃ H ₈ (g)	-103,850	-23,490	269.91
n-Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	-126,150	-15,710	310.12
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (g)	-208,450	+16,530	466.73
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (l)	-249,950	+6,610	360.79
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291,010	+50,150	622.83
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	+82,930	+129,660	269.20
Methyl alcohol	CH ₃ OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
Methyl alcohol	CH ₃ OH(l)	-238,660	-166,360	126.80
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(l)	-277,690	-174,890	160.70
Oxygen	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
Hydrogen	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
Nitrogen	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
Hydroxyl	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70

Source: From JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Dow Chemical Co., 1971); *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; and *API Research Project 44* (Carnegie Press, 1953).

TABLE A-27

Properties of some common fuels and hydrocarbons

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density, ¹ kg/L	Enthalpy of vaporization, ² kJ/kg	Specific heat, ¹ c_p , kJ/kg·K	Higher heating value, ³ kJ/kg	Lower heating value, ³ kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C _n H _{2.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

11 ANEXO IV – TABELAS DE SZARGUT

Appendix 4 Reference states†

Table A.4.1 Enthalpy and exergy of formation for inorganic substances at reference state ($T_0 = 298.15$ K, $P_0 = 101.325$ kPa)

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
Ag	s	107.870	47.48	70.2
Ag ₂ CO ₃	s	275.749	-17.38	115.0
AgCl	s	143.323	0	22.2
AgF	s	126.868	47.60	118.5
AgNO ₃	s	169.875	-76.91	43.1
Ag ₂ O	s	231.739	63.91	57.6
Ag ₂ O ₂	s	247.739	70.69	172.1
Ag ₂ S	s, α	247.804	787.79	709.5
Ag ₂ SO ₄	s	311.802	104.50	139.6
Al	s	26.9815	930.69	888.4
Al ₄ C ₃	s	143.959	4694.51	4588.2
AlCl ₃	s	133.3405	467.18	444.9
Al ₂ O ₃	s, α, corundum	101.9612	185.69	200.4
Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	s, boermitite	119.9765	128.35	195.3
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	s, gibbsite	156.0072	24.13	209.5
Al ₂ S ₃	s	150.155	3313.81	2890.7
Al ₂ (SO ₄) ₃	s	342.148	596.80	529.7
Al ₂ SiO ₅	s, andalusite	162.046	28.03	43.9
Al ₂ SiO ₅	s, kyanite	162.046	25.94	45.1
Al ₂ SiO ₅	s, sillimanite	162.046	0	15.4
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	s, kaolinite	258.1615	68.25	197.8
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	s, mullite	426.0536	630.11	618.8
Ar	g	39.948	0	11.69
As	s	74.9216	462.44	494.6
As ₂ O ₅	s	229.8402	0	216.9
Au	s	196.967	0	15.4
AuCl	s	232.42	45.49	62.2
AuCl ₃	s	303.326	123.09	155.5
AuF ₃	s	253.962	246.46	437.3
Au ₂ O ₃	s	441.932	-80.81	114.7
B	s	10.811	636.39	628.5
B ₂ O ₃	s	69.6202	0	69.4
Ba	s, II	137.34	747.77	747.7
BaCO ₃	s, II	197.35	-75.18	26.3
BaCl ₂	s	208.25	48.69	61.3
BaF ₂	s	175.34	-53.24	57.2
BaO	s	153.34	194.15	224.6
BaO ₂	s	169.34	113.38	169.3
Ba(OH) ₂	s	171.36	45.93	132.9
BaS	s	169.40	1012.88	901.9

† Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R., *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*, Springer (1988)

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
BaSO ₄	s, barite	233.40	0	3.4
Bi	s	208.980	286.94	274.5
Bi ₂ O ₃	s	465.958	0	61.4
Bi ₂ S ₃	s	514.152	2607.05	2237.3
Br ₂	l	159.812	—	101.2
C	s, graphite	12.01115	393.509	410.26
C	s, diamond	12.01115	395.406	413.16
CCl ₄	l	153.823	578.95	473.1
CN	g, cyano	26.01785	858.00	845.0
C ₂ N ₂	g, cyanogen	52.0357	1096.14	1118.9
CO	g	28.0105	282.984	275.10
CO ₂	g	44.0095	0	19.87
CS ₂	l	76.139	1934.09	1694.7
Ca	s, II	40.08	813.57	712.4
CaC ₂	s	64.10	1541.18	1468.3
CaCO ₃	s, aragonite	100.09	0	1.0
CaCO ₃ ·MgCO ₃	s, dolomite	184.411	0	15.1
CaCl ₂	s	110.99	178.21	87.9
CaF ₂	s	78.077	0	11.4
CaFe ₂ O ₄	s	215.77	161.07	104.0
Ca ₂ Fe ₂ O ₄	s	271.85	321.00	194.7
Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	s, tremolite	812.41	425.49	81.6
Ca(NO ₃) ₂	s	164.0898	-124.90	-18.1
CaO	s	56.08	178.44	110.2
CaO·Al ₂ O ₃	s	158.04	351.66	275.4
CaO·2Al ₂ O ₃	s	260.00	541.71	460.4
3CaO·Al ₂ O ₃	s	270.20	716.72	500.6
12CaO·7Al ₂ O ₃	s	1386.68	3415.71	2526.8
CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	s, anortite	222.038	273.92	218.3
Ca(OH) ₂	s	74.09	69.04	53.7
Ca ₃ (PO ₄) ₂	s, α	310.18	0	19.4
CaS	s	72.14	1056.57	844.6
CaSO ₄	s, anhydrite	136.14	104.88	8.2
CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	s, α	145.15	83.16	12.1
CaSO ₄ ·2H ₂ O	s, gypsum	172.17	0	8.6
CaSiO ₃	s, volastonite	116.16	90.24	23.6
Ca ₂ SiO ₄	s, β	172.24	232.28	95.7
Ca ₃ SiO ₅	s	282.32	424.94	219.8
Cd	s, v	112.40	357.10	293.8
Cd	s, α	112.40	356.51	293.2
CdCO ₃	s	172.41	0	40.6
CdCl ₂	s	183.31	126.04	73.4
CdO	s	128.40	98.95	67.3
Cd(OH) ₂	s	146.41	38.26	59.5
CdS	s	144.46	920.60	746.9
CdSO ₄	s	208.46	149.24	88.6
CdSO ₄ ·H ₂ O	s	226.48	84.79	80.6
Cl ₂	g	70.906	160.44	123.6

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
Cl	g	35.453	201.90	87.1
Co	s, α , hexagonal	58.9332	297.06	265.0
CoCO ₃	s	118.9426	-22.38	45.8
CoCl ₂	s	129.839	144.96	118.8
CoO	s	74.9326	59.12	52.8
Co ₃ O ₄	s	240.7872	0	38.2
Co(OH) ₂	s, pink	92.9479	-0.86	50.7
CoS	s	90.997	942.27	792.2
CoSO ₄	s	154.995	134.22	99.8
Cr	s	51.996	569.86	544.3
Cr ₃ C ₂	s	180.010	2415.85	2372.0
Cr ₇ Cl	s	400.005	5007.63	4874.2
CrCl ₂	s	122.902	361.91	311.9
CrCl ₃	s	158.355	281.05	261.6
Cr ₂ O ₃	s	151.990	0	36.5
Cs	s	132.905	362.68	404.4
CsCl	s	168.358	0	51.5
CsNO ₃	s	194.910	-80.22	18.2
Cs ₂ O	s	281.809	407.75	521.8
Cs ₂ SO ₄	s	361.872	30.53	127.0
Cu	s	63.54	201.59	134.2
CuCO ₃	s	123.55	0	31.5
CuCl	s	98.99	144.57	76.2
CuCl ₂	s	134.45	141.95	82.1
CuFe ₂ O ₄	s	239.23	60.62	36.1
CuO	s	79.54	44.27	6.5
Cu ₂ O	s	143.08	234.56	124.4
Cu(OH) ₂	s	97.55	-6.37	15.3
CuS	s	95.60	873.87	690.3
Cu ₂ S	s	159.14	1049.10	791.8
CuSO ₄	s	159.60	155.65	89.8
Cu ₂ SO ₄	s	223.14	377.15	253.6
D ₂	g	4.02946	249.199	263.8
D ₂ O	g	20.02886	0	31.2
D ₂ O	l	20.02886	-45.401	22.3
F ₂	g	37.9968	406.07	466.3
Fe	s, α	55.847	412.12	376.4
Fe ₃ C	α , cementite	179.552	1654.97	1560.2
FeCO ₃	s, siderite	115.856	65.06	125.9
FeCl ₂	s	126.753	230.77	197.6
FeCl ₃	s	162.206	253.29	230.2
FeCr ₂ O ₄	s	223.837	107.10	129.1
Fe _{0.947} O	s, wustite	68.8865	124.01	113.3
FeO	s	71.846	140.16	127.0
Fe ₂ O ₃	s, hematite	159.692	0	16.5
Fe ₃ O ₄	s, magnetite	231.539	117.98	121.6
Fe(OH) ₃	s	106.869	-48.14	39.6
FeS	s, α	87.911	1037.54	885.6

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
FeS ₂	s, pyrite	119.975	1684.72	1428.7
FeSO ₄	s	151.909	209.11	173.0
FeSi	s	83.933	1249.42	1157.3
FeSiO ₃	s	131.931	118.07	161.7
Fe ₂ SiO ₄	s, fayalite	203.778	255.30	236.2
FeTiO ₃	s	151.75	118.90	131.4
H ₂	g	2.01594	241.818	236.1
H	g	1.00797	338.874	331.3
HCl	g	36.461	108.82	84.5
HDO	g	19.0213	0.21	18.8
HDO	l	19.0213	-44.38	10.0
HF	g	20.0064	52.82	80.0
HNO ₃	l	63.0129	-53.19	43.5
H ₂ O	g	18.01534	0	9.5
H ₂ O	l	18.01534	-44.012	0.9
H ₃ PO ₄	s	98.0013	-76.26	104.0
H ₂ S	g	34.080	946.61	812.0
H ₂ SO ₄	l	98.077	153.25	163.4
He	g	4.0026	0	30.37
Hg	l	200.59	63.82	115.9
Hg ₂ CO ₃	s	461.189	-12.39	179.8
HgCl ₂	s	271.50	0	60.8
Hg ₂ Cl ₂	s	472.09	22.86	144.5
HgO	s, red, orthorhombic	216.59	-27.01	57.3
HgS	s, red	232.65	731.08	674.8
HgSO ₄	s	296.65	81.73	146.0
Hg ₂ SO ₄	s	497.24	110.36	223.4
I ₂	s	253.8088	—	174.7
K	s	39.102	356.63	366.6
KAlSi ₃ O ₄	s, adularia	278.337	66.26	99.9
K ₂ CO ₃	s	138.213	-43.58	85.1
KCl	s	75.555	0	19.6
KClO ₄	s	138.553	6.67	136.0
KF	s	58.100	-7.77	62.2
KNO ₃	s	101.1069	-135.90	-19.4
K ₂ O	s	94.203	350.04	413.1
KOH	s	56.109	52.72	107.6
K ₂ S	s	110.268	1024.40	943.0
K ₂ SO ₃	s	158.266	300.47	302.6
K ₂ SO ₄	s	174.266	4.62	35.0
K ₂ SiO ₃	s	154.288	75.9	137.9
Kr	g	83.80	0	34.36
Li	s	6.939	328.10	393.0
Li ₂ CO ₃	s	73.887	-166.33	70.1
LiCl	s	42.392	0	70.7
Li ₂ O	s	29.877	57.38	225.7
LiOH	s	23.946	-35.73	74.1
Li ₂ SO ₄	s	109.940	-52.86	204.3

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
Mg	s	24.312	725.71	633.8
MgAl ₂ O ₄	s, spinel	142.273	274.17	230.3
MgCO ₃	s	84.321	23.43	37.9
MgCl ₂	s	95.218	244.65	165.9
MgFe ₂ O ₄	s	200.004	121.53	77.9
MgO	s	40.311	124.38	66.8
Mg(OH) ₂	s	58.327	42.73	40.9
Mg(NO ₃) ₂	s	148.3218	-64.34	57.4
Mg ₃ (PO ₄) ₂	s	262.879	76.59	130.0
MgS	s	56.376	1105.11	901.6
MgSO ₄	s	120.374	166.22	80.7
MgSiO ₃	s	100.396	87.73	22.0
Mg ₂ SiO ₄	s	140.708	188.35	74.9
Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	s, chrysolite	277.134	117.06	61.3
Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	s, talc	379.289	140.26	36.5
Mg ₂ TiO ₄	s	160.52	231.48	134.3
Mn	s, α	54.9381	520.03	482.3
Mn ₃ C	s	176.82545	1958.20	1862.3
MnCO ₃	s	114.9475	19.42	81.8
MnCl ₂	s	125.844	199.18	165.4
MnFe ₂ O ₄	s	230.630	118.36	121.4
MnO	s	70.9375	134.81	119.4
MnO ₂	s	86.9369	0	21.1
Mn ₂ O ₃	s	157.8744	81.09	89.4
Mn ₃ O ₄	s	228.8119	172.26	171.6
Mn(OH) ₂	s, amorphous	88.9528	66.47	107.3
MnS	s, green	87.002	1031.23	873.5
MnSO ₄	s	151.000	180.20	142.4
MnSiO ₃	s	131.022	110.08	102.3
Mo		95.94	745.09	730.3
Mo ₂ C		203.89	1838.88	1824.6
MoO ₂	s	127.94	156.15	201.2
MoO ₃	s	143.94	0	68.2
Mo ₂ S ₃	s	288.07	3302.43	2891.2
MoS ₂	s	160.068	1960.78	1723.1
N ₂	gg	28.0134	0	0.72
N ₂ , atmospheric	gg	28.1541	0	0.69
NH ₃	gg	17.0305	316.62	337.9
NH ₄ CL	s	53.491	249.43	331.3
NH ₄ NO ₃	s	80.04348	118.08	294.8
(NH ₄) ₂ SO ₄	s	132.138	511.84	660.6
NO	gg	30.0061	90.25	88.9
NO ₂	gg	46.0055	33.18	55.6
N ₂ O	gg	44.0128	82.05	106.9
N ₂ O ₄	gg	92.0110	9.163	106.5
N ₂ O ₅	gg	108.0104	11.30	125.7
Na	s	22.9898	330.90	336.6
NaAlO ₂	s	81.9701	128.40	151.7

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
NaAlSi ₂ O ₆ ·H ₂ O	s, analcime	220.055	35.41	104.2
NaAlSi ₃ O ₈	s, low albite	262.2245	72.75	105.5
Na ₂ CO ₃	s	105.9891	75.62	41.5
NaCl	s	58.443	0	14.3
NaHCO ₃	s	84.0071	-101.94	21.6
NaI	s	149.8942		136.1
NaNO ₃	s	84.9947	-135.62	-22.7
Na ₂ O	s	61.9790	243.82	296.2
NaOH	s	39.9972	23.79	74.9
Na ₂ S	s	78.044	1014.84	921.4
Na ₂ SO ₃	s	126.042	297.63	287.5
Na ₂ SO ₄	s	142.041	0	21.4
Na ₂ SiO ₃	s	122.064	11.31	66.1
Na ₂ Si ₂ O ₅	s	182.149	13.28	67.6
Na ₄ SiO ₄	s	184.043	151.45	256.6
Ne	g	20.183	0	27.19
Ni	s	58.71	239.74	232.7
Ni ₃ C	s	188.14	1180.09	1142.9
NiCO ₃	s	118.72	-49.93	36.4
NiCl ₂	s	129.62	94.85	97.2
NiO	s	74.71	0	23.0
Ni(OH) ₂	s	92.72	-48.13	25.5
NiS	s	90.77	883.15	762.8
Ni ₃ S ₂	s	240.26	1967.14	1720.2
NiSO ₄	s	154.77	92.25	90.4
NiSO ₄ ·6H ₂ O	s, α, tetragonal, green	262.86	-266.75	53.6
O ₂	g	31.9988	0	3.97
O	g	15.9994	249.17	233.7
O ₃	g	47.9982	142.67	169.1
P	s, α, white	30.9738	840.06	875.8
P	s, red, triclinic	30.9738	822.49	863.6
P ₄ O ₁₀	s, hexagonal	283.8892	376.21	825.3
Pb	s	207.19	305.64	232.8
PbCO ₃	s	267.20	0	23.5
PbCl ₂	s	278.10	106.67	42.3
PbO	s, yellow	223.19	88.32	46.9
PbO	s, red	223.19	86.65	45.9
PbO ₂	s	239.19	28.24	19.4
Pb ₃ O ₄	s	685.57	198.53	105.2
Pb(OH) ₂	s	241.20	32.48	20.6
PbS	s	239.25	930.64	743.7
PbSO ₄	s	303.25	111.12	37.2
PbSiO ₃	s	283.27	70.88	31.2
Pb ₂ SiO ₄	s	506.46	159.07	75.5
Rb	s	85.47	350.38	388.6
Rb ₂ CO ₃	s	230.95	-33.90	152.4
RbCl	s	120.92	0	48.6
Rb ₂ O	s	186.94	370.60	491.3

EXERGETICS

Substance	State	Molar mass [kg/kmol]	Enthalpy [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
S	s, rhombic	32.064	725.42	609.6
SO ₂	g	64.0628	428.59	313.4
SO ₃	g	80.0622	329.70	249.1
Sb	s, III	121.75	485.97	435.8
Sb ₂ O ₃	s	291.50	263.07	251.2
Sb ₂ O ₄	s	307.50	62.63	83.7
Sb ₂ O ₅	s	323.60	0	52.3
Se	s, black	78.96	–	346.5
Si	s	28.086	910.94	854.6
SiC	s, α , hexagonal	40.097	1241.69	1204.6
SiCl ₄	l	169.898	544.81	481.9
SiO ₂	s, α , quartz	60.085	0	1.9
SiO ₂	s, α , cristobalite	60.085	1.46	2.8
SiO ₂	s, amorphous	60.085	7.45	7.9
SiS ₂	s	92.214	2149.23	1866.3
Sn	s, I, white	118.69	580.74	544.8
Sn	s, II, gray	118.69	578.65	544.9
SnCl ₂	s	189.60	416.08	386.4
SnO	s	134.69	294.97	289.9
SnO ₂	s	150.69	0	29.1
SnS	s	150.75	1205.74	1056.1
SnS ₂	s	182.82	1863.8	1604.6
Sr	s	87.62	826.34	730.2
SrCO ₃	s	143.63	0	6.2
SrCl ₂	s	158.53	157.93	72.6
SrO	s	103.62	234.30	170.2
SrO ₂	s	119.62	191.96	140.4
SrS	s	119.68	1098.99	891.8
SrSO ₄	s	183.68	98.66	7.1
Ti	s	47.90	944.75	906.9
TiC	s	59.91	1154.16	1136.7
TiO	s	63.90	425.14	418.5
TiO ₂	s, rutile	79.90	0	21.4
Ti ₂ O ₃	s	143.80	368.66	385.5
Ti ₃ O ₅	s	223.70	375.10	413.2
TiS ₂	s	112.03	2060.45	1875.9
U	s	238.03	1230.10	1190.7
UCl ₃	s	344.39	577.35	550.1
UCl ₄	s	379.84	499.39	475.2
UCl ₅	s	415.30	536.93	513.6
UO ₂	s	270.03	145.19	162.9
UO ₃	s	286.03	0	43.9
U ₃ O ₈	s	842.085	115.49	218.5
V	s	50.942	775.30	721.1
VC	s	62.953	1067.96	1032.6
VO	s	66.941	343.51	318.9
VO ₂	s	82.940	57.74	61.9
V ₂ O ₃	s	149.882	322.60	299.7

EXERGETICS

Table A.4.2 Enthalpy and exergy of formation for organic substances at reference state ($T_0 = 298.15 \text{ K}$, $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$)

Chemical formula	Name	State	Molar mass kg/kmol	Enthalpy of formation [kJ/mol]	Exergy [kJ/mol]
CH ₂	Methylene	g	14.02709	1032.9	1030.5
CH ₃	Methyl	g	15.03506	889.9	900.5
Aliphatic saturated hydrocarbons C _n H _{2n+2}					
CH ₄	Methane	g	16.04303	802.33	831.65
C ₂ H ₆	Ethane	g	30.07012	1427.79	1495.84
C ₃ H ₈	Propane	g	44.09721	2045.4	2154.0
C ₄ H ₁₀	<i>n</i> -Butane	g	58.1243	2658.4	2805.8
C ₅ H ₁₂	<i>n</i> -Pentane	g	72.15139	3274.3	3463.3
		l		3247.2	3461.8
C ₆ H ₁₄	<i>n</i> -Hexane	g	86.17848	3889.3	4118.5
		l		3857.6	4114.5
C ₇ H ₁₆	<i>n</i> -Heptane	l	100.20557	4464.7	4761.7
C ₈ H ₁₈	<i>n</i> -Octane	l	114.23266	5074.4	5413.1
C ₉ H ₂₀	<i>n</i> -Nonane	l	128.25975	5684.2	6064.9
C ₁₀ H ₂₂	<i>n</i> -Decane	l	142.28684	6294.0	6716.8
C ₁₁ H ₂₄	<i>n</i> -Undecane	l	156.31393	6908.6	7376.9
C ₁₂ H ₂₆	<i>n</i> -Dodecane	l	170.34102	7518.8	8029.4
C ₁₃ H ₂₈	<i>n</i> -Tridecane	l	184.36811	8129.0	8682.0
C ₁₄ H ₃₀	<i>n</i> -Tetradecane	l	198.3952	8739.2	9334.5
C ₁₅ H ₃₂	<i>n</i> -Pentadecane	l	212.42229	9349.4	9984.8
C ₁₆ H ₃₄	<i>n</i> -Hexadecane	l	226.44938	9959.6	10639.7
Cycloparaffins C _n H _{2n}					
C ₃ H ₆	Cyclopropane	g	42.08127	1959.2	2043.2
C ₄ H ₈	Cyclobutane	g	56.10836	2388.7	2516.2
C ₆ H ₁₂	Cyclohexane	g	84.16254	3691.4	3914.3
		l		3658.3	3909.2
C ₆ H ₁₂	Methylcyclopentane	l	84.16254	3673.5	3910.8
C ₇ H ₁₄	Methylcyclohexane	g	98.18963	4295.5	4556.9
C ₈ H ₁₆	Ethylcyclohexane	g	112.21672	4914.3	5228.5
		l		4873.8	5205.9
C ₉ H ₁₈	<i>n</i> -Propylcyclohexane	l	126.24381	5483.3	5857.7
C ₁₀ H ₂₀	<i>n</i> -Butylcyclohexane	l	140.2709	6094.3	6511.5
Olefins (ethylenic hydrocarbons) C _n H _{2n}					
C ₂ H ₄	Ethylene	g	28.05418	1323.1	1361.1
C ₃ H ₆	Propylene	g	42.08127	1927.7	2003.9
C ₄ H ₈	1-Butylene	g	56.10836	2542.9	2659.7

EXERGETICS

formula			mass	of formation	
			kg/kmol	[kJ/mol]	[kJ/mol]
C ₆ H ₁₂	1-Hexylene	g	84.16254	3772.9	3970.5
		l		3742.2	3967.9
C ₇ H ₁₄	1-Heptylene	g	98.18963	4388.0	4625.5
		l		4338.5	4604.6
Acetylene hydrocarbons C _n H _{2n-2}					
C ₂ H ₂	Acetylene	g	26.03824	1255.6	1265.8
C ₃ H ₄	Propyne	g	40.06533	1850.9	1899.5
C ₄ H ₆	1-Butyne	g	54.09242	2465.6	2552.3
C ₆ H ₁₀	1-Hexyne	g	82.1466	3696.3	3865.1
C ₇ H ₁₂	1-Heptyne	g	96.17369	4311.4	4520.5
C ₈ H ₁₄	1-Octyne	g	110.20078	4923.2	5170.3
C ₉ H ₁₆	1-Nonyne	g	124.22787	5537.9	5825.1
Diene hydrocarbons C _n H _{2n-2}					
C ₃ H ₄	Propadiene	g	40.06533	1472.1	1523.8
C ₅ H ₈	Pentadiene	g	68.11951	2789.2	2914.8
Aromatic hydrocarbons (benzene derivatives)					
C ₆ H ₆	Benzene	g	78.11472	3171.6	3303.6
		l		3137.7	3298.5
C ₇ H ₈	Toluene	g	92.14181	3774.4	3943.4
		l		3736.4	3931.0
C ₈ H ₁₀	Ethylbenzene	g	106.1689	4390.0	4598.8
		l		4347.7	4587.9
C ₈ H ₁₀	<i>o</i> -Xylene	l	106.1689	4332.8	4573.1
C ₉ H ₁₂	<i>n</i> -Propylbenzene	l	120.19599	4957.5	5249.1
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Butylbenzene	l	134.22308	5567.7	5892.0
C ₁₆ H ₂₆	<i>n</i> -Decylbenzene	l	218.38562	9198.3	9700.8
Solid hydrocarbons					
C ₁₀ H ₈	Naphthalene	s	128.17526	4984.2	5255.0
C ₁₀ H ₁₄	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	s	134.22308	5533.0	5880.0
C ₁₀ H ₁₀	2-Methylnaphthalene	s	142.20235	5574.9	5881.4
C ₁₁ H ₁₆	Pentamethylbenzene	s	148.25017	6131.6	6516.0
C ₁₂ H ₁₈	Hexamethylbenzene	s	162.27726	6739.1	7171.0
C ₁₄ H ₁₀	Anthracene	s	178.2358	6850.9	7218.1
C ₁₄ H ₁₀	Phenanthrene	s	178.2358	6835.9	7201.8
C ₁₄ H ₁₄	1,1-Diphenylethan	s	182.26768	7250.9	7665.9
C ₁₈ H ₃₈	<i>n</i> -Octadecane	s	254.50356	11116.7	11937.4
C ₁₉ H ₁₆	Triphenylmethane	s	244.33937	9579.7	10109.2
C ₂₄ H ₁₈	1,3,5-Triphenylbenzene	s	306.41106	11850.1	12490.3
Chemical	Name	State	Molar	Enthalpy	Exergy

12 ANEXO V – ELEMENTOS TÉCNICOS DO GRUPO GERADOR

Fonte: Caterpillar®

G3516E

GAS ENGINE TECHNICAL DATA



ENGINE SPEED (rpm):	1500	RATING STRATEGY:	STANDARD
COMPRESSION RATIO:	11.6:1	FUEL:	Nat Gas
AFTERCoolER TYPE:	8CAC	FUEL SYSTEM:	CAT LOW PRESSURE
AFTERCoolER - STAGE 2 INLET (°C):	43		WITH AIR FUEL RATIO CONTROL
AFTERCoolER - STAGE 1 INLET (°C):	87	FUEL PRESSURE RANGE(kPag):	10-35
JACKET WATER OUTLET (°C):	94	FUEL METHANE NUMBER:	80
ASPIRATION:	TA	FUEL LHV (MJ/Nm3):	35.64
COOLING SYSTEM:	JW+OC+1AC, 2AC	ALTITUDE CAPABILITY AT 25°C INLET AIR TEMP. (m):	460
CONTROL SYSTEM:	ADEMS	APPLICATION:	Genset
EXHAUST MANIFOLD:	DRY	POWER FACTOR:	0.8
COMBUSTION:	Low Emission	VOLTAGE(V):	400-11000
NOx EMISSION LEVEL (mg/Nm3 NOx):	500		

RATING	NOTES	LOAD	100%	75%	50%
GENSET POWER	(WITHOUT FAN) (1)(2)	kW	1590	1193	795
GENSET POWER	(WITHOUT FAN) (1)(2)	kVA	1988	1491	994
ENGINE POWER	(WITHOUT FAN) (2)	bkW	1658	1242	832
GENERATOR EFFICIENCY	(1)	%	95.9	96.0	96.5
GENSET EFFICIENCY@ 1.0 Power Factor	(ISO 3046/1) (3)	%	41.6	40.2	37.4
THERMAL EFFICIENCY	(4)	%	44.4	46.2	49.2
TOTAL EFFICIENCY (@ 1.0 Power Factor)	(5)	%	86.0	86.4	86.6

ENGINE DATA						
GENSET FUEL CONSUMPTION	(ISO 3046/1)	(6)	MJ/kW-hr	8.73	9.02	9.68
GENSET FUEL CONSUMPTION	(NOMINAL)	(6)	MJ/kW-hr	8.94	9.24	9.91
ENGINE FUEL CONSUMPTION	(NOMINAL)	(6)	MJ/kW-hr	8.57	8.87	9.47
AIR FLOW (0°C, 101.3 kPa)	(WET)	(7)	Nm3/kW-hr	3.99	4.03	4.04
AIR FLOW	(WET)	(7)	kg/kW-hr	5.15	5.21	5.22
FUEL FLOW (0°C, 101.3 kPa)			Nm3/hr	399	309	221
COMPRESSOR OUT PRESSURE			kPa(abs)	411	317	218
COMPRESSOR OUT TEMPERATURE			°C	214	171	123
AFTERCoolER AIR OUT TEMPERATURE			°C	44	44	44
INLET MAN. PRESSURE		(8)	kPa(abs)	384	290	198
INLET MAN. TEMPERATURE	(MEASURED IN PLENUM)	(9)	°C	45	45	45
TIMING		(10)	°BTDC	30	25	16
EXHAUST TEMPERATURE - ENGINE OUTLET		(11)	°C	410	455	534
EXHAUST GAS FLOW (0 °C, 101.3 kPa)	(WET)	(12)	Nm3/kW-hr	4.24	4.29	4.31
EXHAUST GAS MASS FLOW	(WET)	(12)	kg/kW-hr	5.34	5.40	5.42
MAX INLET RESTRICTION		(13)	kPa	2.50	2.50	2.50
MAX EXHAUST RESTRICTION		(13)	kPa	5.00	5.00	5.00

EMISSIONS DATA - ENGINE OUT						
NOx (as NO2)	(corr. to 5% O2)	(14)(15)	mg/Nm3 DRY	500	500	500
CO	(corr. to 5% O2)	(14)(16)	mg/Nm3 DRY	995	980	1065
THC (mol. wt. of 15.84)	(corr. to 5% O2)	(14)(16)	mg/Nm3 DRY	3356	3350	3176
NMHC (mol. wt. of 15.84)	(corr. to 5% O2)	(14)(16)	mg/Nm3 DRY	503	503	476
NMNEHC (VOCs) (mol. wt. of 15.84)	(corr. to 5% O2)	(14)(16)(17)	mg/Nm3 DRY	336	335	318
HCHO (Formaldehyde)	(corr. to 5% O2)	(14)(16)	mg/Nm3 DRY	231	241	229
CO2	(corr. to 5% O2)	(14)(16)	g/Nm3 DRY	211	211	212
EXHAUST OXYGEN		(14)(18)	% DRY	9.4	9.1	8.3
LAMBDA		(14)(18)		1.75	1.70	1.60

ENERGY BALANCE DATA						
LHV INPUT		(19)	kW	3950	3063	2190
HEAT REJECTION TO JACKET WATER (JW)		(20)(27)	kW	415	357	298
HEAT REJECTION TO ATMOSPHERE		(21)	kW	109	91	73
HEAT REJECTION TO LUBE OIL (OC)		(22)(27)	kW	124	113	100
HEAT REJECTION TO EXHAUST (LHV TO 25°C)		(23)(24)	kW	1199	1008	783
HEAT REJECTION TO EXHAUST (LHV TO 120°C)		(23)	kW	795	700	575
HEAT REJECTION TO A/C - STAGE 1 (1AC)		(25)(27)	kW	300	150	42
HEAT REJECTION TO A/C - STAGE 2 (2AC)		(25)(28)	kW	146	102	62

CONDITIONS AND DEFINITIONS

Engine rating obtained and presented in accordance with ISO 3046/1. (Standard reference conditions of 25°C, 100 kPa barometric pressure.) No overload permitted at rating shown. Consult the altitude deration factor chart for applications that exceed the rated altitude or temperature.

Emission levels are at engine exhaust flange prior to any after treatment. Values are based on engine operating at steady state conditions, adjusted to the specified NOx level at 100% load and corrected to 5 % exhaust oxygen. Tolerances specified are dependent upon fuel quality. Fuel methane number cannot vary more than ± 3.

For notes information consult page three.