FÁBIO DE SOUZA FLORENTINO

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA NA AVICULTURA DE CORTE

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2004

DADOS CURRICULARES

FÁBIO DE SOUZA FLORENTINO

NASCIMENTO	14.08.1977 – RESENDE – RJ
FILIAÇÃO	Ivan de Souza Florentino Enide Conceição de Souza
1995/2000	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica UNESP – Campus de Guaratinguetá
2002/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, UNESP – Campus de Guaratinguetá

à minha família, que participou de maneira
fundamental no desenvolvimento deste trabalho

AGRADECIMENTOS

Gostaria de explicitar profundos agradecimentos aos professores *Pedro Magalhães Sobrinho* e *José Luz Silveira*, pela orientação incansável e fundamental para a solução dos desafios relativos à realização desta obra,

aos professores *Umberto Desideri* e *Francesco Fantozzi*, que auxiliaram de maneira importante durante a estadia na Universidade de Perugia – Itália,

aos professor *Jorge de Lucas Junior*, pelas informações de grande valor relacionadas à fase inicial da construção do trabalho,

ao professor *Luiz Octávio Mattos dos Reis*, pelas expressivas observações realizadas durante o exame de qualificação,

aos professores *João Andrade Carvalho Junior* e *José Rui Camargo*, pelas importantes correções e sugestões dadas oriundas da defesa da dissertação,

aos senhores *Flávio Eduardo Siviero* (Prime Tech Comércio e Serviços Ltda) e *Persival Zuquetto* (Trigas Indústria e Comércio Ltda), pelas informações técnicas utilizadas durante os cálculos empregados,

aos amigos da *República Inferninho*, meu lar durante o tempo de realização do trabalho, pela paciência e pelo tradicional companheirismo, além dos amigos agregados à minha casa, moradores de repúblicas vizinhas,

à minha companheira *Karina Saolly Kawahara*, que participou de modo importante no auxílio às dificuldades encontradas, tornando-se uma colaboradora e incentivadora indispensável.

Este trabalho foi realizado com o auxílio financeiro da CAPES

"Em cada indivíduo, em cada povo, em cada cultura existe algo que é relevante para os demais, por mais diferentes que sejam entre si. Enquanto cada grupo pretender ser o dono exclusivo da verdade, enquanto perdurar essa estreiteza de visão, a paz mundial permanecerá um sonho inatingível".

Henry Isaac Sobel, 60
Presidente do Rabinato da Congregação Israelita Paulista
(Folha de São Paulo, 16/04/2004)

FLORENTINO, F. S. *Estudo da aplicação do potencial energético da biomassa na avicultura de corte*. Guaratinguetá, 2004. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Com os avanços humanos observados desde os tempos pré-históricos houve uma crescente necessidade de se obter cada vez mais energia, de modo a sustentar o desenvolvimento das civilizações e de seus meios de produção. Atualmente grande parte do consumo energético mundial é proveniente de fontes não renováveis de energia, ou seja, fontes energéticas cuja formação pela natureza ocorre num tempo muito maior do que a velocidade com que são consumidas, tornando-se passíveis de se esgotarem, além das substâncias indesejáveis e dos impactos ambientais decorrentes de sua utilização.

O presente trabalho enfoca a aplicação de uma forma renovável de energia na utilização em pequenas comunidades ou propriedades rurais. O objetivo geral é a obtenção de um produto de valor energético originado da biomassa que possa suprir as necessidades energéticas do local considerado (granja de frangos de corte), com o emprego de um processo de transformação adequado.

Para efetuar o aproveitamento da energia contida na biomassa em benefício do local onde ela é disponível, duas tecnologias são apresentadas e comparadas quanto a aplicabilidade nas condições locais, realizando-se uma análise sobre a quantidade e forma de energia produzidas, a quantidade e forma de energia necessárias no local, a possibilidade do emprego de um sistema de cogeração para satisfazer tais condições, os custos do investimento e o tempo de retorno do capital.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa, pirólise, biodigestão anaeróbia, cogeração.

FLORENTINO, F. S. *Study of the aplication of biomass energy profit in the broiler aviculture*. Guaratinguetá, 2004. 129p. Thesis (Master in Mechanical Engineering) – Engineering College, Guaratinguetá unit, São Paulo State University.

ABSTRACT

With the human advances observed since the pre-historic ages have grown the needing of more and more quantities of energy to feed the development of the civilizations and their production ways. Nowadays, a big part of the world energetic demand is obtained from unrenewable energy sources, that means sources of energy formed naturally during a time so much longer than their consumption velocity, being possible to become exhausted, moreover undesirable products are generated and environmental impacts are caused by their utilization.

The present work studies an aplication of a renewable source of energy in small villages or properties. The general objective is the obtainment of an energetic product from the biomass, to supply the local energy needings (broiler chicken farm), employing an adequate transformation process.

To make the biomass energy profit, looking for the benefit of the place where the biomass is available, two technologies of are presented and compared as regards the quantity and kind of produced energy, the quantity and kind of necessary energy in the place, the possibility of the utilization of a cogeneration system to satisfy the local conditions, the costs of the investment and the pay-back period.

KEYWORDS: biomass, pyrolysis, anaerobic digestion, cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – RECURSOS ENERGÉTICOS

Figura 2.1: Variação da quantidade de carvão mineral disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo..... 27

Figura 2.2: Variação da quantidade de gás natural disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo..... 29

Figura 2.3: Variação da quantidade de petróleo disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo..... 31

Figura 2.4: Variação do potencial hidrelétrico nacional com o tempo..... 34

Figura 2.5: Projeção da oferta interna de energia..... 37

Figura 2.6: Comparação do consumo mundial de energia por fonte, entre 1973 e 2000..... 38

Figura 2.7: Produção mundial de energia elétrica por fonte, entre 1973 e 2000..... 39

CAPÍTULO 3 – PIRÓLISE

Figura 3.1: Esquema do processo de pirólise..... 41

Figura 3.2: Esquema da propagação da frente de pirólise dentro da partícula de biomassa..... 42

Figura 3.3: Tipos de processo de pirólise..... 43

Figura 3.4: Esquema do sistema completo de pirólise..... 50

CAPÍTULO 4 – BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Figura 4.1: Biodigestor modelo indiano..... 58

Figura 4.2: Biodigestor modelo chinês..... 59

Figura 4.3: Biodigestor modelo batelada..... 60

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE TÉCNICA

Figura 5.1: Esquema da utilização dos produtos da biodigestão..... 64

Figura 5.2: Esquema da seção transversal do galpão de frangos..... 67

Figura 5.3: Esquema dos abastecimentos intercalados dos grupos de biodigestores..... 68

Figura 5.4: Esquema dos vetores energéticos na parede..... 77

Figura 5.5: Esquema da parede com resistências térmicas..... 78
Figura 5.6: Ângulos da geometria solar..... 82
Figura 5.7: Fator de distribuição para a radiação solar total..... 84
Figura 5.8: Relação entre radiações diárias difusa e total em função da relação entre radiações total diária e extraterrestre..... 85
Figura 5.9: Variação da radiação solar extraterrestre com relação aos meses do ano..... 86
Figura 5.10: Bico aspersor..... 90
Figura 5.11: Utilização de aspersores em ventiladores..... 90
Figura 5.12: Esquema do método de insuflamento..... 91

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE ECONÔMICA

Figura 6.1: Esquema do sistema de cogeração usado..... 96
Figura 6.2: Variação do custo do combustível (C_{comb}) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k)..... 101
Figura 6.3: Variação do custo da eletricidade gerada (C_{el}) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k)..... 101
Figura 6.4: Variação do custo do ar quente produzido (Caq) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k)..... 102
Figura 6.5: Variação da receita (R) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k)..... 102

ANEXO

Figura A.1: Esquema do scrubber..... 123
Figura A.2: Variação da produção animal com a temperatura..... 123
Figura A.3: Poder emissivo de um corpo negro..... 124
Figura A.4: Dependência da absortividade com o comprimento de onda..... 125
Figura A.5: Fator de distribuição para a radiação solar difusa..... 126
Figura A.6: Diagrama psicrométrico..... 127
Figura A.7: Diagrama de Moody..... 128
Figura A.8: Curvas de rugosidade de diversos materiais..... 129

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – RECURSOS ENERGÉTICOS

Tabela 2.1: Consumo mundial de combustíveis fósseis na geração elétrica em 2000..... 26

CAPÍTULO 4 – BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Tabela 4.1: Relação C/N em massa para dejetos de diferentes origens..... 52

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE TÉCNICA

Tabela 5.1: Balanço energético para o motor TOTEM..... 69

Tabela 5.2: Relação entre a potência do motor e a vazão de água de refrigeração... 70

Tabela 5.3: Resultados do cálculo dos coeficientes global e de transferência de calor por convecção, em kJ/kg.K..... 81

Tabela 5.4: Resultados obtidos..... 95

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE ECONÔMICA

Tabela 6.1: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização,para taxa anual de juros de 4 % 100

Tabela 6.2: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização, para taxa anual de juros de 12 %..... 100

Tabela 6.3: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização, para taxa anual de juros de 20 %..... 100

ANEXO

Tabela A.1: Propriedades de sólidos e líquidos..... 117

Tabela A.2: Vazão de infiltração de ar por frestas..... 117

Tabela A.3: Propriedades termofísicas do ar a pressão atmosférica..... 118

Tabela A.4: Propriedades termofísicas de materiais comuns..... 119

Tabela A.5: Velocidades de escoamento em dutos de ar condicionado..... 121

Tabela A.6: Comprimentos equivalentes às perdas de carga localizadas de componentes com relação ao diâmetro..... 122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEN	Balanço Energético Nacional
CAEEB	Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EE/FSU	Denominação do grupo de países em estruturação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
FAE	Fontes Alternativas de Energia
FCS	Fator de Calor Sensível
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IEA	International Environment Agency
MCI	Motor de Combustão Interna
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	Matéria Seca
NB	Norma Brasileira
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
séc	Século
SF	Sólidos Fixos
SPE	Society of Petroleum Engineers
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TG	Turbina a Gás
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
U. S.	United States
WPC	World Petroleum Congress

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m^2]
A/C	relação ar/combustível
C	carbono, custo [US$]
c	velocidade do som no meio [m/s]
C_2H_6	etano
C_3H_8	propano
C_4H_{10}	butano
C_6H_{14}	hexano
Ca	cálcio
$CaCl_2$	cloreto de cálcio
CH_4	metano
CH_3SH	metil mercaptanas
CM	custo de manutenção [US$/kWh]
C/N	relação carbono nitrogênio
CO	monóxido de carbono
Co	cobalto
CO_2	dióxido de carbono
c_p	calor específico à pressão constante [kJ/kg.K]
Cu	cobre
$CuSO_4$	sulfato de cobre
E	energia [kJ], potência [kW], rugosidade relativa [1]
e	rugosidade [m]
EM	Energia metabolizável [kJ/dia]
F	fator de distribuição
f	fator de atrito [1]
Fe	ferro
g	aceleração gravitacional [m/s^2]
GP	ganho na produção energética [US$]

h	coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$], entalpia [kJ/kg]
H	hidrogênio, tempo anual de operação [h/ano]
H_2	gás hidrogênio
H_2O	água
H_2S	gás sulfídrico
I	intensidade de radiação horária [$kJ/m^2.h$], investimento [US$]
K	potássio
k	condutividade térmica [W/m.K], período de amortização de capital [anos]
L	comprimento característico [1], espessura [m]
M	número de Mach [1]
m	massa [kg], vazão mássica [kg/s]
Mg	magnésio
Mn	manganês
N	nitrogênio, duração do dia [h]
N_2	gás nitrogênio
NH_3	amônia
NO_x	óxidos de nitrogênio
Nu	número de Nusselt [1]
O	oxigênio
O_2	gás oxigênio
P	fósforo
p	pressão [Pa]
P_{el}	preço da eletricidade comprada da rede [US$/kW]
Per	perdas de energia [kW]
pH	potencial hidrogeniônico [1]
Pr	número de Prandtl [1]
q	calor [W]
r	taxa anual de juros [%]
R	receita [US$/ano]

Ra	número de Rayleigh [1]
R_b	razão entre radiações incidentes sobre plano inclinado e horizontal
Re	número de Reynolds [1]
T	temperatura [ºC, K]
U	coeficiente global de transferência de calor [$W/m^2.K$]
V	vazão volumétrica [m^3/s]
v	velocidade [m/s]

gregos

α	absortividade [%], difusividade térmica [m^2/s]
β	coeficiente volumétrico de expansão térmica [K^{-1}], ângulo de inclinação da superfície [º]
δ	ângulo de declinação do sol [º]
Δ	variação
Δp	perda de carga [Pa]
θ	ângulo qualquer [º]
η	rendimento [%]
ϕ	umidade relativa [%], latitude [º]
ρ	massa específica [kg/m^3, kg/Nm^3]
μ	viscosidade dinâmica (ou absoluta) [$N.s/m^2$]
ν	viscosidade cinemática [m^2/s]
ω	ângulo horário [º]

subscritos

amb	ambiente
aq	ar quente
aq-conv	ar quente convencional - gerado em bomba de calor
biod	biodigestor
C	cimento
comb	combustível

e	externo, equivalente
el	eletricidade
g	global
ger	gerador
i	interno
L	comprimento característico
n	normal
op	operação
p	pirólise, produzida
S	superfície, sensível
sc	sistema de cogeração
ST	sólidos totais
T	tijolo, total
t	térmico
tc	trocador de calor
vent	ventilador
∞_e	ar externo
∞_i	ar interno

SUMÁRIO

RESUMO
ABSTRACT
LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS
LISTA DE SÍMBOLOS
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... 21
CAPÍTULO 2 – RECURSOS ENERGÉTICOS..... 23
2.1 INTRODUÇÃO..... 23
2.2 FONTES DE ENERGIA..... 24
2.2.1 Fontes não renováveis de energia..... 25
2.2.1.1 Carvão mineral..... 26
2.2.1.2 Gás Natural..... 27
2.2.1.3 Petróleo..... 30
2.2.2 Fontes renováveis de energia..... 31
2.2.2.1 Energia Solar..... 32
2.2.2.2 Energia Eólica..... 33
2.2.2.3 Energia Hídrica..... 33
2.2.2.4 Energia da Biomassa..... 35
2.3 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA NO MUNDO..... 36
2.4 AVICULTURA DE CORTE..... 39
CAPÍTULO 3 – PIRÓLISE..... 41
3.1 PROCESSO DE PIRÓLISE..... 41
3.2 PRODUTOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE..... 44
3.2.1 Produto gasoso..... 44
3.2.2 Produto líquido..... 46
3.2.3 Produto sólido..... 47
3.3 PIROLISADOR..... 48

CAPÍTULO 4 – BIODIGESTÃO ANAERÓBIA..... 51
4.1 PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA..... 51
4.2 PRODUTOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA..... 54
4.2.1 Efluente líquido..... 54
4.2.2 Biogás..... 55
4.3 BIODIGESTORES..... 57
4.3.1 Modelo indiano..... 58
4.3.2 Modelo chinês..... 59
4.3.3 Modelo batelada..... 60
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE TÉCNICA..... 62
5.1 INTRODUÇÃO..... 62
5.2 PROPOSTA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO..... 63
5.2.1 Dimensionamento do sistema de cogeração..... 65
5.2.1.1 Determinação da energia disponível..... 65
5.2.1.2 Geração elétrica..... 69
5.2.1.3 Geração térmica..... 70
5.2.2 Cálculo de carga térmica..... 73
5.2.2.1 Calor proveniente dos animais..... 73
5.2.2.2 Calor proveniente da iluminação..... 75
5.2.2.3 Calor proveniente da infiltração por aberturas..... 75
5.2.2.4 Calor proveniente da transmissão pelas paredes..... 76
5.2.2.4.1 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor..... 78
5.2.2.4.2 Determinação da absortividade da parede..... 81
5.2.2.4.3 Cálculo da radiação solar incidente..... 82
5.2.3 Dimensionamento do sistema de condicionamento..... 87
5.2.3.1 Sistema elétrico..... 88
5.2.3.2 Sistema evaporativo..... 89
5.3 COMENTÁRIOS..... 95
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE ECONÔMICA..... 96
6.1 INTRODUÇÃO..... 96
6.2 CÁLCULOS..... 96

6.3 COMENTÁRIOS..... 103
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES..... 104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 106
ANEXO..... 117

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do aproveitamento energético de resíduos sólidos oriundos de atividades rurais como um meio de contribuir para o desenvolvimento de pequenos produtores e comunidades isoladas, além de aumentar a participação das fontes renováveis de energia na oferta interna de energia brasileira. Para proceder a transformação da energia contida na biomassa em um produto de valor energético (combustível), duas tecnologias de origens diferentes são analisadas; a primeira é um processo termoquímico que ocorre sob altas temperaturas e taxas de aquecimento (pirólise), enquanto a segunda é um processo biológico natural, que ocorre sob temperaturas mais baixas (biodigestão anaeróbia), tendo como objetivos principais a análise dos processos considerados e o estudo do emprego de uma das tecnologias na geração de um tipo de substância de valor energético, capaz de ser aproveitada no local de sua geração. Portanto, o trabalho foi estruturado de modo a se obter uma ordem lógica em seu desenvolvimento.

O capítulo 2 contém informações de como as fontes de energia são utilizadas no mundo, mostrando um panorama geral da matriz energética mundial e nacional. Com isso pode-se observar os níveis do consumo de energia por fonte, de modo a se fazer uma comparação entre as fontes renováveis e não renováveis. É também mostrada a avicultura de corte como fonte de biomassa, possibilitando o emprego de uma tecnologia de aproveitamento da biomassa gerada na atividade para a utilização local do produto energético na geração de energia. Para tal são analisadas duas tecnologias diferentes de aproveitamento da biomassa: a pirólise e a biodigestão anaeróbia.

O capítulo 3 trata da pirólise, a primeira das tecnologias analisadas, apresentando os princípios do processo e seus fatores mais importantes. São também mostrados os produtos gerados no processo e os principais tipos de pirólise, além de informações sobre o equipamento utilizado, chamado pirolisador.

O capítulo 4 trata da biodigestão anaeróbia, o outro objeto de estudo, mostrando os princípios do processo e as principais características dos produtos gerados. São apresentadas alternativas conhecidas de utilização do produto energético (biogás), assim como tipos de reatores (biodigestores) geralmente empregados no meio rural.

No capítulo 5 é escolhido um dos processos de aproveitamento da biomassa apresentados nos capítulos 3 e 4, de acordo com sua facilidade de implantação e de utilização de seus produtos. São determinadas a quantidade e a forma de energia necessárias na instalação, de acordo com as condições estipuladas e, posteriormente, é calculada a quantidade de energia oriunda do processo de aproveitamento da biomassa, de modo a dimensionar o sistema a ser empregado.

No capítulo 6 é realizada uma análise econômica da configuração estudada no capítulo 5, com o objetivo principal de se encontrar os custos do combustível produzido e da energia gerada, além da receita esperada, determinando o tempo de retorno do capital investido, em função dos níveis de investimento e da taxa anual de juros.

O capítulo 7 apresenta as conclusões a que os resultados obtidos nos capítulos 5 e 6 levam, contendo as considerações finais sobre o trabalho.

CAPÍTULO 2
RECURSOS ENERGÉTICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial (Inglaterra, séc XVIII) e o conseqüente desenvolvimento da civilização humana, houve um aumento mundial na demanda de energia, usada para suprir os meios de produção. Energia é um fator fundamental no progresso da civilização, porque estimula e embasa seu crescimento econômico e seu desenvolvimento (OMER & FADALLA, 2003). A geração de energia na verdade é a transformação de uma forma de energia inicial em uma outra desejada, como por exemplo o uso de uma queda d'água na geração de eletricidade (centrais hidrelétricas), e o uso de um combustível na geração de calor e eletricidade (centrais termoelétricas).

As centrais hidrelétricas aproveitam a energia potencial da água armazenada num reservatório direcionando-a a uma turbina hidráulica, que recebe o fluxo d'água para produzir rotação em seu eixo e, empregando-se um gerador, energia elétrica. Para se obter energia suficiente na água para movimentar a turbina, é necessária uma certa altura do nível do reservatório, oriundo do represamento do curso d'água, gerando um lago de acumulação que permite uma utilização controlada do volume disponível.

As termoelétricas transformam a energia térmica (provinda da queima de um combustível) em energia mecânica de eixo numa turbina, que transmite esta energia a um gerador elétrico para a obtenção de eletricidade. A queima do combustível na câmara de combustão produz uma série de gases a altas temperaturas e pressões, que passam entre seqüências de pás, fixas ao eixo central da máquina, causando a rotação deste enquanto os gases se expandem e esfriam, obtendo-se assim energia mecânica e posteriormente elétrica. As termoelétricas também podem ser baseadas em ciclos a vapor, onde a energia do combustível é usada numa caldeira e o vapor gerado é responsável pela movimentação da turbina.

Com este princípio, para se gerar eletricidade é necessário o consumo de um combustível, geralmente de origem fóssil como fonte energética. Os combustíveis fósseis, fonte não-renovável de energia, são compostos por hidrocarbonetos que não estão presentes no nosso meio ambiente, mas sim numa região abaixo da biosfera. Com a queima desses hidrocarbonetos são liberadas na atmosfera grandes quantidades de CO_2 formado por átomos de carbono que originalmente não estavam no meio ambiente, causando aumento na quantidade deste gás que deve ser processada pelas plantas. O aumento nas atividades industriais (que aumentou o consumo de produtos industrializados e, conseqüentemente, a geração de resíduos) baseadas na queima destes combustíveis causou um aumento mundial nas emissões de CO_2, levando-se em conta que paralelamente a este fato, existem cada vez menos áreas verdes para consumir este gás. Portanto ocorre um rápido aumento na concentração deste gás na atmosfera, dificultando a perda de calor da Terra para o espaço, causando o aquecimento global. De acordo com SAYIGH (1999), está claro que o aquecimento global está e continuará mudando o clima e o terreno de vários países, a não ser que medidas emergenciais sejam tomadas.

2.2 FONTES DE ENERGIA

As fontes de energia são classificadas segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), realizado anualmente pelo MME – Ministério de Minas e Energia, em fontes energéticas primárias ou secundárias. As fontes de energia primária são representadas pelos produtos energéticos providos pela natureza, na sua forma direta, como o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, o urânio, a biomassa (lenha, cana-de-açúcar, etc.), a energia hidráulica, energia solar e outras. Elas são formas de energia que podem ser consumidas diretamente nos diversos setores da economia, como a lenha e o carvão, ou principalmente como matéria-prima para a obtenção das fontes secundárias de energia nos chamados centros de transformação (refinarias de petróleo, destilarias, centrais hidro e termoelétricas, etc).

As fontes de energia primária ainda podem ser classificadas em não-renováveis ou renováveis. São consideradas como fontes não-renováveis aquelas passíveis de se esgotarem por serem utilizadas com velocidade bem maior que o tempo necessário para sua formação. Nesta categoria estão os derivados de petróleo, os combustíveis radioativos, a energia geotérmica e o gás natural. Fontes renováveis de energia (ou fontes alternativas de energia – FAE) são aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização, como as águas dos rios, marés, sol, ventos, ou cujo manejo pelo homem pode ser feito de forma compatível com suas necessidades (como no caso da biomassa: cana-de-açúcar, florestas energéticas e resíduos animais, humanos ou industriais). Tais fontes podem ser usadas, por exemplo, para produzir eletricidade principalmente através de usinas hidrelétricas, eólicas, solares fotovoltaicas e centrais termelétricas.

2.2.1 Fontes não renováveis de energia

Alguns exemplos mais conhecidos de fonte não renovável de energia são o gás natural, o petróleo, o carvão mineral e o urânio. Dentre elas, as mais usadas no mundo são o carvão mineral, o gás natural e o petróleo (na forma de seus derivados). Estes produtos são usados principalmente na geração elétrica, na fabricação de outros combustíveis e de produtos para fins não energéticos. De acordo com BEN (2003), a utilização das fontes não renováveis na geração elétrica é maior nos países industrializados, como mostra a Tab. 2.1.

Tabela 2.1: Consumo mundial de combustíveis fósseis na geração elétrica em 2000 (IEA*, citado no BEN, 2003).

Consumo de combustíveis [TWh]					
Carvão Mineral		**Gás Natural**		**Petróleo e Derivados**	
Estados Unidos	2110	Estados Unidos	630	Japão	159
China	1062	Rússia	370	Estados Unidos	125
Índia	420	Japão	239	México	97
Alemanha	299	Reino Unido	147	Itália	86
Japão	254	Itália	101	Arábia Saudita	81
África do Sul	193	Irã	93	China	46
Rússia	176	Tailândia	61	Taipe Chinesa	35
Austrália	161	Malásia	54	Iraque	33
Polônia	138	Alemanha	53	Rússia	33
Coréia	126	Países Baixos	52	Paquistão	27
Demais países	1074	Demais países	877	Demais países	496
Total Mundial	**6013**	**Total Mundial**	**2677**	**Total Mundial**	**1218**

2.2.1.1 Carvão mineral

O carvão mineral é uma rocha combustível, originada pela decomposição da matéria orgânica sob a influência do tempo, pressão, calor e processos bioquímicos, contendo diversas impurezas devido à natureza da matéria que lhe deu origem, como também à presença de certos compostos estranhos existentes no meio ambiente.

Os carvões apresentam uma composição básica de carbono, silício, ferro, alumínio e cálcio, além de certa porção de água, que corresponde ao seu grau higroscópico, sendo definida como umidade inerente (conhecida como "umidade normal" do carvão e pode ser

* IEA – International Environment Agency, EUA.

considerada o grau higroscópio de equilíbrio), umidade quimicamente combinada (faz parte da constituição química dos minerais e rochas existentes no carvão) e umidade livre (corresponde à umidade excedente, que pode ser facilmente eliminada por exposição à atmosfera). Portanto, para o uso do carvão mineral, deve-se computar a umidade inerente e a quimicamente combinada.

A Figura 2.1 mostra a variação da quantidade disponível de carvão mineral nas reservas nacionais com o tempo, entre 1973 e 2001.

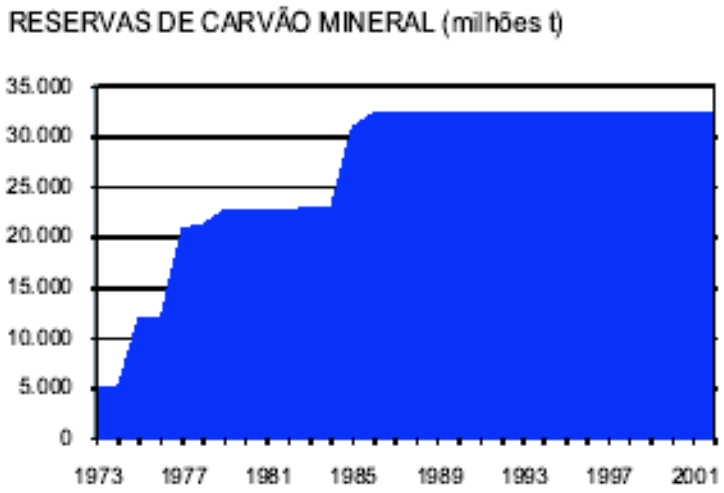


Figura 2.1: Variação da quantidade de carvão mineral disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo (BEN, 2003).

2.2.1.2 Gás Natural

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos e outros compostos químicos, encontrada na fase gasosa ou em solução com o petróleo em reservatórios naturais subterrâneos. O principal composto presente é o metano (CH_4), além do etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), hexano (C_6H_{14}), e pequenas quantidades de compostos mais pesados. Dependendo da jazida, ele pode conter pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio, água, gás carbônico, monóxido de carbono, gás sulfídrico, hélio, argônio e mercaptanas. O vapor d'água presente encontra-se saturado, com seu teor

definido pela temperatura de distribuição do gás. O CO_2, apesar de ser considerado inerte por não queimar, forma ácido em presença de água livre. Quanto à sua origem, o gás natural é classificado em gás associado (encontrado dissolvido no petróleo cru e/ou formando uma camada protetora gasosa sobre ele) e gás não associado (encontrado em depósitos subterrâneos, não acompanhado de hidrocarbonetos em fase líquida).

O gás natural e o petróleo são originários principalmente da maturação térmica da matéria orgânica contida nas rochas, e suas características dependem do tipo de matéria orgânica predominante. As rochas regeneradoras são continuamente soterradas pela deposição de novos sedimentos, o que as submete a uma elevação constante de temperatura e pressão, formando os hidrocarbonetos.

Uma série de características fazem do gás natural uma alternativa atraente frente aos demais combustíveis, como por exemplo:

- Encontra-se pronto para o consumo, não sendo necessário manipulação ou preparação antes da combustão;

- É facilmente miscível com o ar, obtendo-se grande contato entre o combustível e o ar, reduzindo-se o excesso de ar necessário para assegurar a combustão completa;

- Desloca-se e é manipulado com facilidade, sendo necessária uma válvula para regular com precisão as vazões de ar e gás, permitindo variações bruscas da vazão, mantendo-se constante a relação de mistura;

- Praticamente não contém impurezas, visto que seus produtos de combustão têm baixos níveis de poluição e teor de enxofre, quando comparado aos outros combustíveis e não origina depósito de resíduos, diminuindo os custos de operação e manutenção;

- Permite várias configurações e tipos de queimadores, alem de grande flexibilidade na regulagem e controle dos equipamentos, aumentando sua eficiência.

Na industria o gás natural pode ser utilizado em caldeiras, em substituição ao óleo combustível, para gerar vapor ou aquecer o fluido térmico, utilizado no aquecimento das industrias de alimento, papel e celulose, têxtil, para acionamento de ventiladores, bombas e compressores e na geração de eletricidade. O uso em fornos industriais é amplo, sobretudo devido à ausência de cinzas e ao baixo teor de enxofre, que poderiam contaminar o produto.

O aumento da quantidade de gás natural disponível em reservas nacionais com o tempo é apresentado na Fig. 2.2.

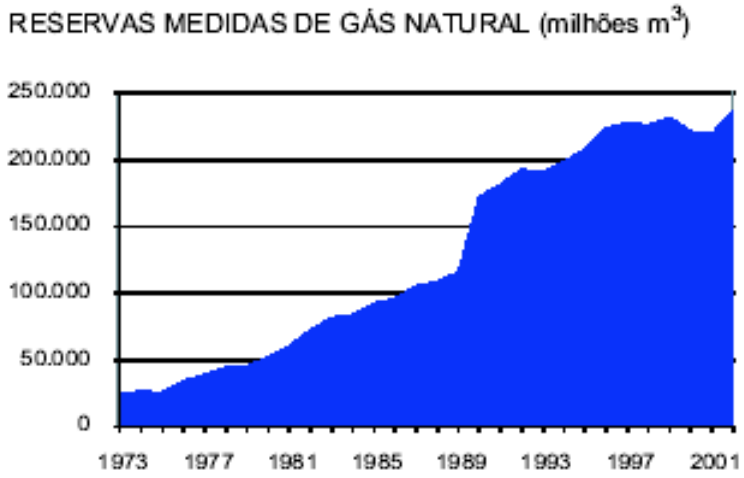


Figura 2.2: Variação da quantidade de gás natural disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo (ANP, citado no BEN, 2003)[*].

[*] De 1990 a 1998 passaram a ser adotados os critérios da Society of Petroleum Engineers (SPE) e da World Petroleum Congress (WPC), o que eleva um pouco as reservas medidas comparadas aos critérios aplicados nos anos anteriores. A partir de 1999, os valores foram calculados com base na portaria ANP n0. 009, de 21/01/2000

2.2.1.3 Petróleo

O petróleo é a matéria prima de inúmeros produtos usados em massa em todo o mundo, como plásticos, produtos químicos e combustíveis, fazendo dele um dos produtos mais comercializados mundialmente. Ele é a maior fonte de combustíveis líquidos do mundo, do qual se pode obter também combustíveis sólidos (coque de petróleo) e gasosos (gás liquefeito de petróleo – GLP). Os derivados de petróleo são responsáveis por mais de 50 % das fontes térmicas atualmente utilizadas pelo homem.

O petróleo, quando sai dos poços, vem acompanhado por água salgada e gases ricos em componentes leves, facilmente recuperados e tratados. As frações condensáveis constituem a denominada gasolina natural, a qual irá ser misturada às gasolinas comuns produzidas nas refinarias. Os gases, isentos de componentes condensáveis, vêm a ser o gás seco, também denominado gás de petróleo, de larga aplicação industrial. A água é removida do petróleo parte junto aos poços produtores, parte nas refinarias, antes do seu processamento. O petróleo bruto, isento de gases e água (também denominado petróleo cru), é processado nas refinarias para a remoção de todos seus derivados, desde os mais leves aos mais pesados, como o GLP, nafta, gasolina comum e especial, querosene, óleo Diesel, óleo combustível e, em alguns casos, o asfalto.

A Figura 2.3 mostra o aumento da quantidade de petróleo disponível em reservas nacionais, de acordo com o tempo.

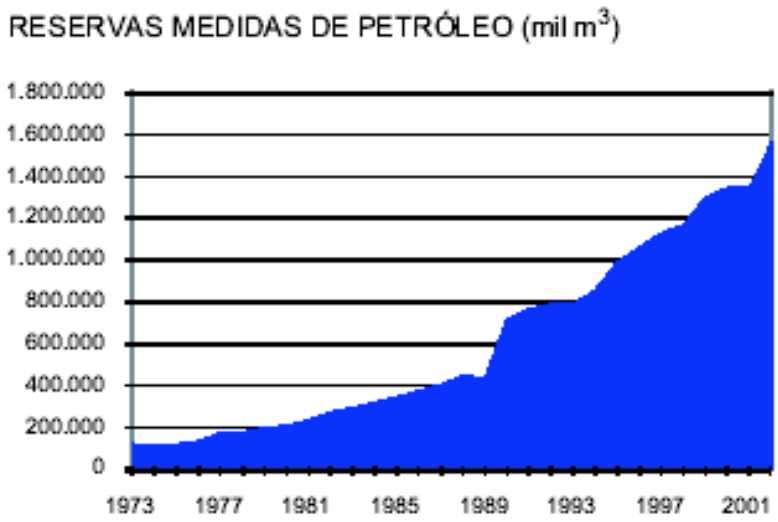


Figura 2.3: Variação da quantidade de petróleo disponível em reservas nacionais conhecidas com o tempo (ANP, citado no BEN, 2003)*.

2.2.2 Fontes renováveis de energia

Combustíveis de origem fóssil estão em reservas finitas e precisam ser cuidadas, e os esforços orientados para a procura de novas fontes de energia (OMER & FADALLA, 2003). Com isso, torna-se importante aumentar a utilização das fontes alternativas de energia, que são menos poluentes (ou não-poluentes) e renováveis (ou inesgotáveis) para a utilização humana. As fontes renováveis de energia têm tido maior atenção nos últimos anos devido ao aumento na concentração de CO_2, NO_x e SO_x na atmosfera, resultante da crescente aplicação dos combustíveis fósseis (CHEN *et al.*, 2003). É importante ressaltar que os derivados de petróleo não estão apenas em combustíveis, mas também em materiais de uso cotidiano (como plásticos e produtos químicos) que possuem potencial poluidor. Esses produtos são jogados no lixo após a sua utilização e levam um tempo muito grande para que se degradem na natureza. A redução do uso de derivados de

* De 1990 a 1998 passaram a ser adotados os critérios da Society of Petroleum Engineers (SPE) e da World Petroleum Congress (WPC), o que eleva um pouco as reservas medidas comparadas aos critérios aplicados nos anos anteriores. A partir de 1999, os valores foram calculados com base na portaria ANP n0. 009, de 21/01/2000

petróleo também se estende a este setor, ou seja, a diminuição do consumo desses produtos visando a redução da massa deste tipo de lixo e o aumento da pesquisa em materiais alternativos para substituir os antigos poluidores.

A energia solar, eólica e da biomassa devem desempenhar papéis importantes nos países em desenvolvimento, de modo a suprir a crescente demanda de energia (INIYAN *et al.*, 2000). As fontes alternativas de energia são aplicadas geralmente enfocando a geração de energia em áreas rurais isoladas, muito longe para a chegada de linhas de transmissão, que ainda apresenta atrasos em inovação e construção (JURADO *et al.*, 2003), onde a população geralmente pobre não tem e nem terá acesso à energia num futuro próximo (ALVARENGA *et al.*, 1996). A utilização da energia solar em painéis fotovoltaicos, por exemplo, apresenta-se como uma opção para a eletrificação destes lugares, devido ao baixo potencial de consumo (SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997). Nestes lugares, um sistema de geração usando combustíveis convencionais apresenta muitos problemas, como o freqüente transporte de combustível, além de impactos ambientais nos habitats naturais (FANTOZZI *et al.*, 2002).

2.2.2.1 Energia Solar

A energia solar é a fonte de energia dominante, representando 99,98% do total da energia disponível, sendo a responsável, direta ou indiretamente, pela existência das fontes renováveis de energia, como a energia hidroelétrica, da biomassa e eólica, e as não renováveis como carvão, petróleo, gás natural e xisto.

O aproveitamento térmico da energia solar se faz por meio de coletores solares, que é o dispositivo responsável pela absorção e transferência da energia da radiação solar para o fluido de trabalho sob a forma de energia térmica. Além dos coletores solares, para um sistema de aquecimento completo, são necessários um reservatório térmico, um sistema de circulação de água e um sistema auxiliar de aquecimento elétrico.

A conversão direta da radiação solar em eletricidade é obtida facilmente por células fotovoltaicas que, em resultado de sua importância como fonte principal de energia para os engenhos espaciais, já existem como dispositivos de alto desempenho. A tecnologia fotovoltaica se desenvolveu muito nos últimos anos devido principalmente ao aumento na eficiência, redução do custo e alta confiabilidade (SAYIGH, 1999).

2.2.2.2 Energia Eólica

A energia eólica é uma fonte limpa, abundante em muitas partes do mundo, possui custo relativamente baixo, sustentável, seguro, popular e que pode gerar empregos. Ela tem sido usada a mais de 3500 anos nas velas que transportavam bens no Egito e na Mesopotâmia, e nos moinhos que trituravam o trigo para produzir farinha (SAYIGH, 1999). A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e, através de conhecimentos da indústria aeronáutica, os equipamentos para geração eólica evoluíram de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia.

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cataventos multipás para bombeamento d'água, algumas medidas indicam a existência de um grande potencial eólico ainda pouco explorado.

2.2.2.3 Energia Hídrica

De acordo como BEN (2003), o potencial de aproveitamento energético de um rio se chama potencial hidrelétrico, sendo medido em termos da máxima energia gerada continuamente naquelas condições hidrológicas, chamada energia firme. A Figura 2.4 mostra a variação do potencial hidrelétrico nacional com o tempo.

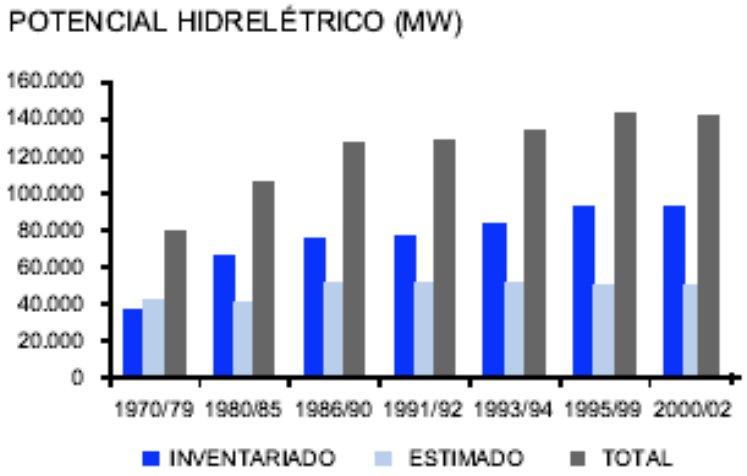


Figura 2.4: Variação do potencial hidrelétrico nacional com o tempo (BEN, 2003).

O potencial hidrelétrico inventariado engloba as usinas em operação, em construção e ainda os aproveitamentos estudados nos níveis de inventário, viabilidade e projeto básico. De acordo com estudos realizados pelo MME, os valores do potencial hidrelétrico estimado se situam próximos a 35% abaixo do valor inventariado.

O fato de haver um grande número de bacias hidrográficas no Brasil permite que a base da matriz energética brasileira seja composta por energia hídrica, uma forma de geração elétrica sem emissões de substâncias poluidoras. Isto não quer dizer que uma usina hidrelétrica não cause impactos ambientais, pois o lago de acumulação formado pela barragem causa uma alteração no microclima local, ocasionando mudanças na fauna e flora, além do possível aparecimento e propagação de doenças ligadas à água. Deve-se considerar também o desalojamento de cidades inteiras com a inundação. Para a construção de uma usina deste tipo, é necessário realizar um estudo de impactos ambientais que irá mensurar as mudanças que ocorrerão após o alagamento da área.

Para minimizar o impacto imposto à natureza com o surgimento do lago, é importante investir em pequenas centrais hidrelétricas (PCH), que alagam uma área menor que as grandes usinas.

2.2.2.4 Energia da Biomassa

A biomassa consiste em plantas, resíduos orgânicos, efluentes agro-industriais e domésticos. Resíduos animais (e humanos) e agrícolas constituem uma grande parte da biomassa e a sua utilização é econômica e ambientalmente importante (Al-MASRI, 2001). Os combustíveis obtidos a partir da biomassa (florestas e resíduos agrícolas) usados na geração elétrica podem ser competitivos em preço e qualidade com os combustíveis fósseis (SAYIGH, 1999), fazendo da biomassa um dos principais potenciais energéticos num futuro próximo (GANESH & BANERJEE, 2001, MATHIEU & DUBUISSON, 2002).

Atualmente, os sistemas de utilização de biomassa e lixo para aproveitamento energético são os ciclos a vapor baseados em combustão em leito fluidizado ou incineração em grelhas (sistemas de baixa a média eficiência) ou ciclos a gás integrados com sistemas de gaseificação (sistemas de média a alta eficiência). A aplicação de cogeração com ciclo combinado associado a um sistema de gaseificação de resíduos agrícolas aumenta a geração de energia e favorecendo a economia das indústrias da agricultura (ZANZI *et al.,* 2002). O uso de sistemas de geração de potência de alta eficiência, baseados em gaseificação e pirólise é um dos meios de se atingir um preço competitivo para a eletricidade gerada, frente às outras fontes (BARKER, 1996).

Entretanto, estes sistemas são de média a grande escala, sendo socialmente impraticáveis em pequenas comunidades isoladas, normalmente localizadas em áreas de proteção ambiental ou ainda intocadas (FANTOZZI *et al.,* 2003). Uma alternativa para a geração energética em pequena escala no meio rural é a possibilidade de utilização da energia da biomassa proveniente da atividade humana no campo, baseando o aproveitamento energético num processo que gere substâncias de valor energético a partir desta biomassa. De acordo com HOBSON *et al.* (1981), citado por SANTOS (1997), o aproveitamento energético da biomassa pode ser classificado em dois tipos: um é de natureza físico-química, envolvendo altas temperaturas e/ou pressões, enquanto que o outro é de natureza microbiológica, sob temperaturas e pressões mais baixas. Nos

capítulos 3 e 4 são apresentados dois tipos de aproveitamento energético da biomassa, que são a pirólise e a biodigestão anaeróbia, respectivamente.

O uso energético da biomassa aumenta a qualidade de vida no campo e, ao substituir os combustíveis fósseis, reduz as importações de petróleo e as emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global (FREITAS *et al.,* 1997). Os biocombustíveis não devem ser somente uma alternativa para os combustíveis fósseis, visto que estes últimos são competitivos somente no ponto de vista econômico, sendo necessário também considerar os benefícios sociais e ambientais (CANAVATE, 1994). A aplicação das tecnologias de aproveitamento energético da biomassa é uma necessidade ambiental e humana de reutilização de resíduos, e numa escala global, uma maneira de reduzir a concentração de CO_2 na atmosfera e conseqüentemente o aquecimento global (SAYIGH, 1999).

2.3 UILIZAÇÃO DA ENERGIA NO MUNDO

A utilização da energia ao redor do mundo é concentrada nos países industrializados, que alimentam a crescente produção de bens de consumo. De acordo com projeções estimadas no BEN (2003), existem três grupos de países: industrializados, em desenvolvimento e em estruturação (EE/FSU), dentre os quais, o grupo que inclui o Brasil (países em desenvolvimento) é o que terá maior aumento na tendência da oferta interna de energia, até 2020, como mostra a Fig. 2.5.

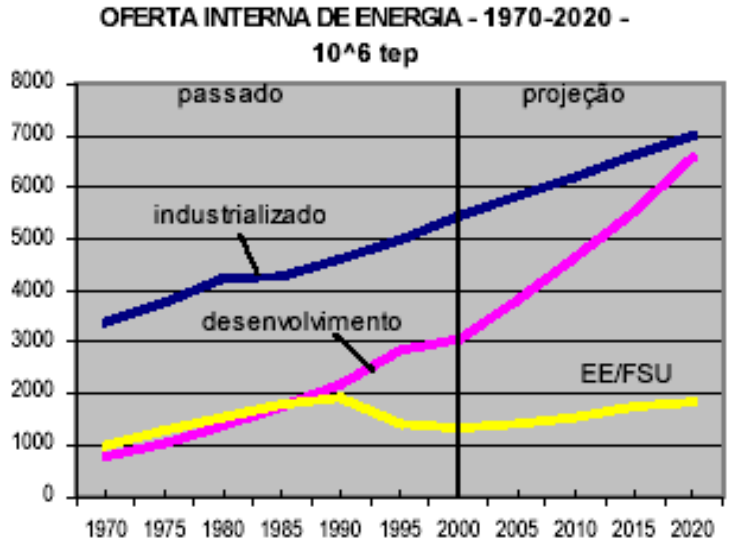


Figura 2.5: Projeção da oferta interna de energia (BEN, 2003).

Os grupos de países são:

- industrializados: Estados Unidos, Canadá, México, Inglaterra, França, Alemanha, Itália, outros industrializados da Europa, Japão e Austrália;
- em desenvolvimento: China, Índia, Coréia do Sul, Turquia, países da África, países da América Central e do Sul e outros em desenvolvimento da Ásia e do Oriente Médio;
- em estruturação (EE/FSU): Rússia, Ucrânia, Belarus, Cazaquistão, Bulgária, Albânia, Croácia, outros da antiga União Soviética, outros da Europa em reestruturação econômica.

Somando-se todas as parcelas de consumo energético dos países, tem-se o total mundial, que é a soma da energia gerada por todas as fontes. A Figura 2.6 apresenta uma comparação do consumo energético mundial em 1973 e em 2000, comparando as porcentagens relativas a cada fonte.

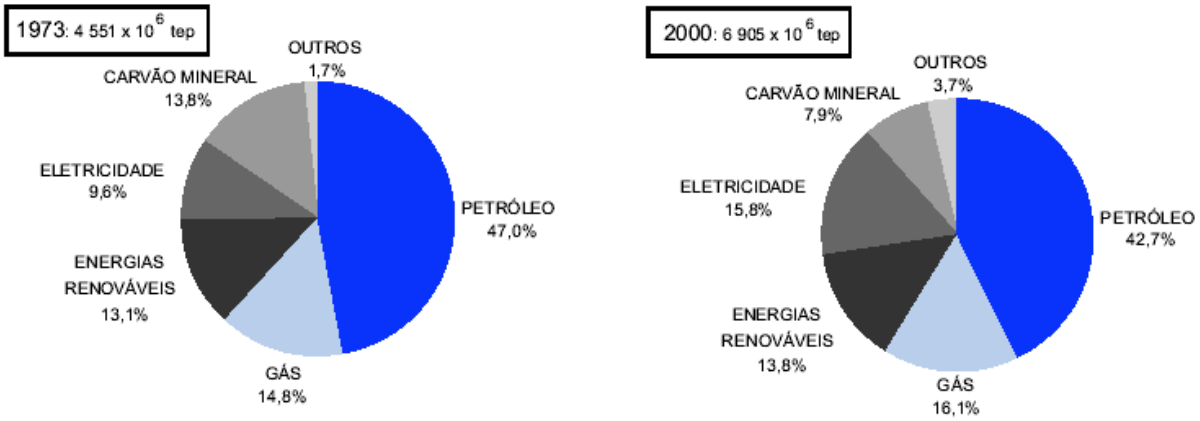


Figura 2.6: Comparação do consumo mundial de energia por fonte, entre 1973 e 2000 (IEA, citado no BEN, 2003).

De acordo com a Fig. 2.6, pode-se dizer que de 1973 a 2000 houve uma diminuição no consumo de petróleo e carvão mineral, gerando um aumento no consumo de energias renováveis, gás natural e eletricidade. Isto significa que as fontes menos poluidoras ganharam certo espaço frente às mais poluidoras, que é um sinal de ligeira melhora no que se diz respeito aos níveis de emissões.

Todos os meios de produção no mundo consomem eletricidade por ser um meio versátil de energia, tendo a facilidade de ser transmitida por cabos. Portanto, grande parte das máquinas que desempenham atividades mecânicas, nas fábricas ou nas casas, é movida à eletricidade, que deve ser transformada a partir de outra forma de energia. A Fig. 2.7 apresenta a utilização mundial de algumas fontes de energia na geração elétrica.

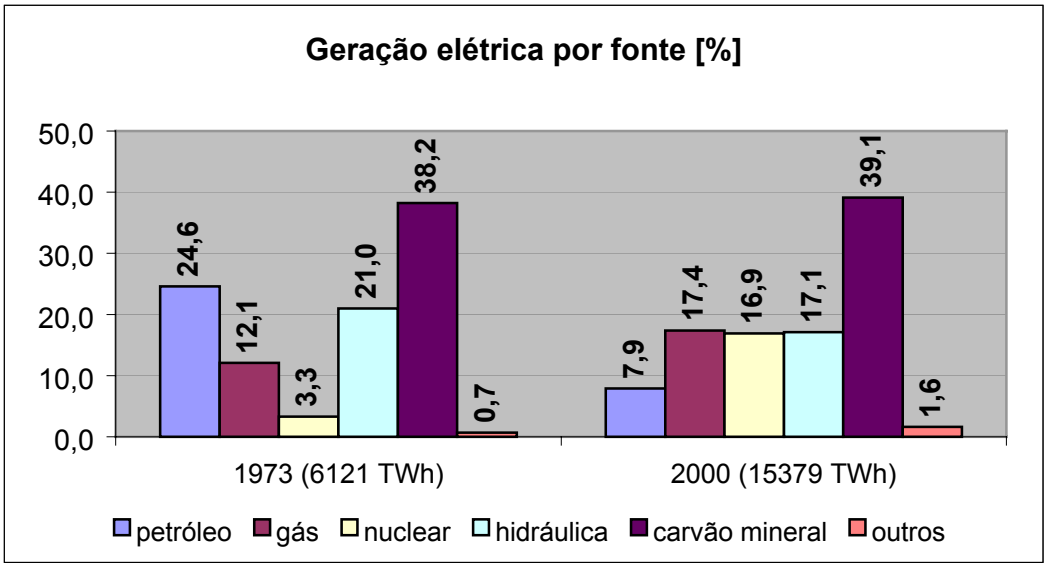


Figura 2.7: Produção mundial de energia elétrica por fonte, entre 1973 e 2000 (IEA, citado no BEN, 2003).

A análise dos recursos energéticos deve levar em conta a eficiência com que estes são usados, além da possibilidade do uso de fontes renováveis e da promoção destas tecnologias no aspecto prático e ecológico (SHIPKOVS *et al.,* 1999). Os combustíveis derivados de petróleo são processados em sistemas de baixa eficiência, necessitando queimar grandes quantidades de combustíveis para gerar relativamente pouca energia.

2.4 AVICULTURA DE CORTE

Segundo a ANUALPEC (2000), citada por FERNANDES FILHO & QUEIROZ (2001), a produção mundial de carne de frango cresceu 44,55 % entre 1991 e 2000, a produção de carne suína cresceu 15,78%, e a produção de carne bovina diminuiu 4,81% neste período. De acordo com a EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (2000), em apenas seis anos (de 1994 a 1999), houve um aumento de 34% no consumo de carne avícola no Brasil, o que foi atribuído à introdução de novas tecnologias de condicionamento térmico, visando principalmente a redução dos custos de produção.

A matéria orgânica proveniente da avicultura de corte é conhecida como cama de frango, que é um material de origem vegetal (como palha ou serragem), que cobre o chão do galpão e protege as aves das perdas de calor. Este material permanece no galpão durante certo tempo, recebendo os dejetos liberados pelas aves, quando deve ser trocado. Portanto pode-se aproveitar o potencial energético da biomassa oriunda desta atividade na geração de energia elétrica e/ou térmica, visando a satisfação das necessidades energéticas locais, convertendo a energia associada à biomassa em benefício do processo de criação.

De acordo com EMBRAPA (1998), a ave precisa de um ambiente com temperaturas que variam entre 32 ºC nos primeiros dias de sua vida, aos 18 ºC no final, aos 49 dias. Nos primeiros 16 dias de vida as aves são mantidas sob aquecimento no galpão dos pintos, enquanto que o restante de sua vida ocorre em ambiente resfriado, se comparado às temperaturas médias do verão brasileiro. Esta temperatura de conforto para o animal adulto é medida em termos de produção e produtividade (NÃÃS, 1989), situando-se entre 18 e 21 ºC, sendo que a elevação desta acarreta uma diminuição da produção de aves.

De acordo com tais informações, pode-se observar a necessidade da implantação de um sistema de condicionamento, visando a obtenção do conforto térmico das aves, empregando assim a energia gerada com o resíduo orgânico. Para tal, nos capítulos seguintes serão apresentados dois tipos de tecnologias de aproveitamento energético da biomassa, obtendo-se com isso uma fonte de aproveitável de energia (combustível) a ser empregada no local.

CAPÍTULO 3
PIRÓLISE

3.1 PROCESSO DE PIRÓLISE

A conversão energética da matéria orgânica em energia térmica é um dos mais antigos processos realizados pela humanidade; a carbonização da biomassa já era aplicada na pré-história. A pirólise é um tipo de aproveitamento da energia química da matéria orgânica para a geração de substâncias combustíveis, em atmosfera inerte (LÉDÉ *et al.*, 2003). O processo de pirólise consiste num conjunto de reações termoquímicas que transformam a matéria orgânica em produtos sólidos, líquidos e gasosos contendo certo poder calorífico (MARIOTTI, 2002), como mostra a Fig. 3.1.

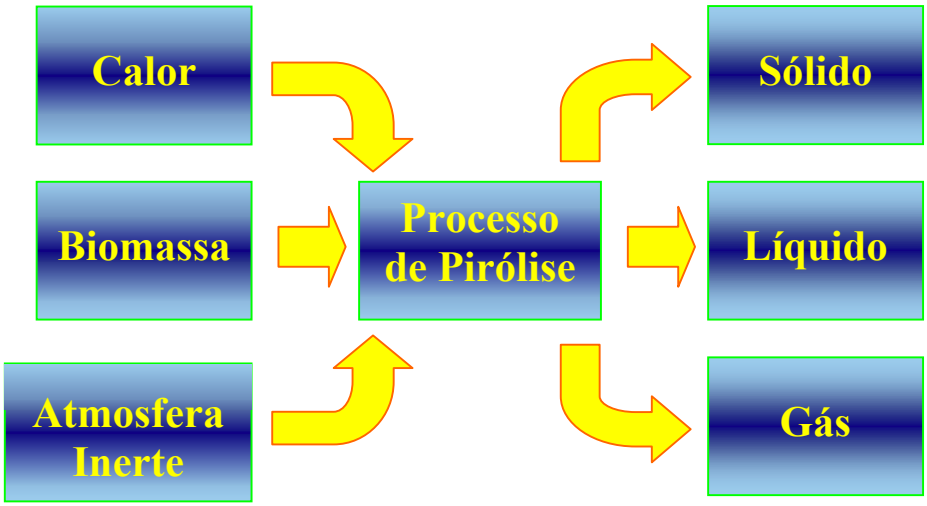
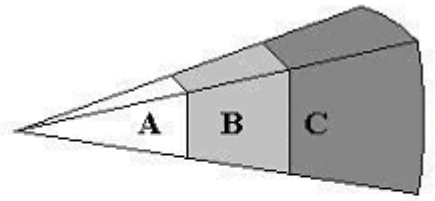


Figura 3.1: Esquema do processo de pirólise

A maioria das reações que compõem a pirólise é endotérmica, com uma pequena parte exotérmica (reações de oxidação), fazendo com que a pirólise seja um processo globalmente endotérmico. Portanto, para que ela ocorra é necessária a inserção de calor nos reagentes (partículas de biomassa), que pode ser transferido ou pelas paredes

do reator (por resistências elétricas ou fluxo de massa aquecida) ou por combustão parcial da biomassa no reator (MOSCA, 2002).

As reações ocorrem inicialmente na superfície da partícula de biomassa, e se propagam para o interior desta com o gradiente de temperatura (CARIDÀ, 2001). À medida que a temperatura aumenta em direção ao centro da partícula, ocorre um movimento da frente de pirólise neste sentido, como mostra a Fig. 3.2.



Zona A: biomassa não reagida
Zona B: biomassa em reação
Zona C: biomassa reagida

Figura 3.2: Esquema da propagação da frente de pirólise dentro da partícula de biomassa (CARIDÀ, 2001).

A pirólise ocorre somente numa faixa onde a temperatura é propícia (zona B), e a frente de pirólise se move em direção ao centro da partícula à medida que a temperatura da biomassa não reagida (zona A) aumenta. A parte externa à zona de pirólise (zona C) é composta pelo produto sólido resultante, que pode sofrer combustão se as condições externas forem propícias.

A temperatura de reação é um dos fatores mais importantes no processo de pirólise, juntamente com a pressão, taxa de aquecimento, tamanho da partícula e tempo de residência. Com a variação da temperatura, variam não só as quantidades de produtos gerados, mas também as características dos mesmos. Os produtos da pirólise são formados em proporções que variam de acordo com as condições de operação do reator e com o tipo de processo de pirólise, rápida ou lenta, como mostra a Fig. 3.3.

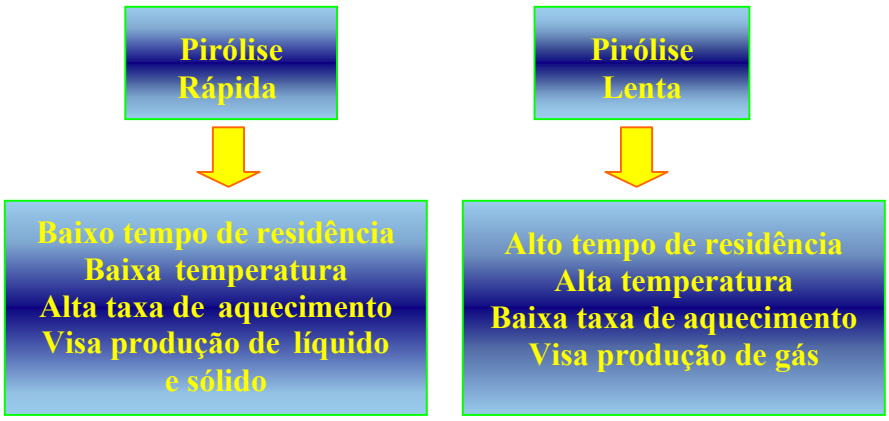


Figura 3.3: Tipos de processo de pirólise.

A pirólise rápida é o tipo com maior aplicação mundial e consiste no rápido aquecimento da matéria orgânica a baixa temperatura (400-500 ºC), num baixo tempo de residência (0,3-1,5 s) (CARIDÀ, 2001). O processo tem como principal objetivo a geração do produto líquido, enquanto que os subprodutos (sólido e gás) podem ser empregados na geração de calor para o processo.

A pirólise lenta é similar à rápida, mas com um tempo de residência maior (da ordem de minutos) e sob temperaturas mais elevadas (>600 ºC). O produto desejado é o gás, podendo-se também usar os subprodutos (líquido e sólido) na geração de calor para o processo. A pirólise lenta é uma tecnologia menos desenvolvida se comparada com a rápida (MARIOTTI, 2002).

A pirólise ocorre quase totalmente na ausência de oxigênio, sendo uma pequena concentração de O_2 necessária nas reações intermediárias de oxidação (MARIOTTI, 2002). Ela é o mecanismo inicial dos processos de gaseificação e combustão (MOSCA, 2002). Entre a combustão, a gaseificação e a pirólise, esta última é o processo que está sendo desenvolvido mais recentemente (ZABANIOTOU & KARABELAS, 1999). Em nível de comparação, a pirólise rápida está sendo desenvolvida há 20 anos, comparada aos mais de 200 anos de gaseificação e aos mais de 2000 anos de combustão (BRIDGEWATER, 2003).

As pesquisas realizadas até hoje, comparando diferentes condições experimentais e diferentes resíduos, ainda não são suficientes para disponibilizar informações básicas sobre a complexa interação entre química e fenômenos do transporte em reações

químicas, dificultando a escolha de materiais apropriados e condições ótimas para pirólise (Di BLASI *et al*., 2003). A dificuldade em modelar o processo de pirólise está na forte dependência de constantes de equilíbrio de dados experimentais, que é dependente do equipamento e do procedimento utilizado (FANTOZZI, 2003). A pirólise pode gerar não somente produtos para serem usados como combustíveis, mas também na substituição de diversos produtos químicos derivados de petróleo (BARTH, 2003).

3.2 PRODUTOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE

A matéria inicial é composta por partículas sólidas que são introduzidas no reator (quase na ausência de oxigênio molecular), e ao atingirem a temperatura de reação, liberam uma fumaça composta pelos produtos gasosos, partículas do produto sólido e vapores do produto líquido da pirólise. O resíduo sólido deve ser separado e posteriormente estes vapores são condensados e o líquido é separado dos gases.

3.2.1 Produto gasoso

O produto gasoso da pirólise é chamado de syngas, e consiste numa mistura gasosa de médio poder calorífico (13-21 MJ/Nm^3), formada principalmente por CO, CO_2, H_2 e hidrocarbonetos leves, podendo ser empregada como combustível em motores de combustão interna (MCI) e turbinas a gás (TG), necessitando de separação de resíduos líquidos (MARIOTTI, 2002), e também de partículas (>3 mm), de modo a manter o conteúdo sólido abaixo de 20 mg/Nm^3. Em aplicações domésticas, as partículas contribuem para o aumento do poder calorífico, não necessitando de purificação. O syngas também pode ser usado na indústria química, na síntese de metano, metanol e amônia.

A formação do syngas é maximizada sob altas temperaturas e alta taxa de aquecimento (ECINAR *et al*., 1996). De acordo com MOSCA (2002), a quantidade de syngas produzido aumenta com o aumento da temperatura de pirólise devido ao favorecimento de certas reações entre os produtos gerados durante a reação.

Basicamente, existem três processos que proporcionam o aumento dos produtos gasosos com o aumento da temperatura. Um deles são as reações de cracking na fase não aquosa do produto líquido, gerando hidrocarbonetos leves e H_2, a partir da decomposição de moléculas orgânicas pesadas, causando uma conseqüente diminuição na formação do produto líquido. Os outros dois processos são reações químicas entre os produtos gasosos metano, monóxido e dióxido de carbono e a água contida no produto líquido e o carbono contido no resíduo sólido, de acordo com as seguintes reações:

- Reações de moléculas de metano e monóxido de carbono com água:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Neste caso, as moléculas de água reagem com metano e CO, perdendo átomos de H, que se combinam para formar H_2. Há então uma diminuição na concentração de água nos produtos da pirólise, observada como uma baixa produção da fase aquosa do produto líquido. O aumento na produção de syngas se dá basicamente por este aumento na produção de gás hidrogênio e de CO_2.

- Reações de moléculas de água e dióxido de carbono com átomos de carbono:

$$H_2O + C \rightarrow CO + H_2$$
$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

O aumento da temperatura favorece a reação de átomos de C contidos no resíduo sólido com moléculas de H_2O e de CO_2, formando CO e H_2. Portanto, ocorre uma perda de átomos de carbono da fase sólida para a gasosa, ou seja, o aumento na produção de syngas é decorrente da diminuição na geração de resíduo sólido.

3.2.2 Produto líquido

O produto líquido da pirólise é composto por uma fase aquosa de substâncias orgânicas leves solúveis, e por uma fase não aquosa composta predominantemente por uma mistura de substâncias orgânicas de alto peso molecular, denominada tar ou bio-óleo.

A solução aquosa é produzida com a umidade da matéria orgânica inicial e com substâncias orgânicas geradas no processo (como ácidos orgânicos, aldeídos, cetonas, fenóis, etc), resultando num efluente de alto potencial poluidor.

O tar é uma substância de alta viscosidade e acidez devido à alta concentração de compostos orgânicos oxigenados, impondo a retirada de oxigênio do líquido antes da combustão (MARIOTTI, 2002). Esta redução se torna necessária porque o oxigênio causa diminuição de seu poder calorífico (aproximadamente 40% de oxigênio em massa no tar, comparando-se a menos de 1% nos óleos combustíveis derivados de petróleo). Apesar de ter que passar por um processo de melhoramento para ser queimado diretamente, o tar raramente atinge os padrões necessários aos combustíveis. Para ser usado como tal, deve-se reduzir sua viscosidade e corrosividade, aumentando sua volatilidade (ECINAR *et al.*, 1996). Ele contém muitos componentes reativos capazes de formar substâncias de alto peso molecular (MEIER *et al.,* 2003), resultando num líquido de alta densidade, podendo ser facilmente estocado e transportado aos locais de uso (BRAMER & BREM, 2003), permitindo o emprego de combustão contínua ou intermitente. Ele não é miscível com outros combustíveis líquidos convencionais (BRIDGEWATER, 2003), e pode ser usado puro ou em uma emulsão com combustíveis fósseis (CHIARAMONTI *et al*., 2003).

O tar é muito diferente dos combustíveis derivados de petróleo, requerendo o desenvolvimento de novos padrões para sua utilização (BRIDGEWATER & GRONLI, 2003), de modo a se obter certa concordância entre os fornecedores do combustível e dos equipamentos onde ele é queimado (caldeiras, motores, turbinas), determinando no tar as propriedades básicas dos combustíveis líquidos (homogeneidade, estabilidade, conteúdo de umidade e de sólidos), de modo a se atingir uma qualidade mínima aceitável para ser usado como tal (GUST *et al*., 2003b). A determinação de sua

composição também servirá para a elaboração de procedimentos de segurança para manuseio e armazenamento, de modo a se controlar os riscos deste produto com relação à população e ao meio ambiente (GIRARD & BLIN, 2003). Portanto é necessário que se desenvolvam processos específicos de refino de tar para tornar prática e economicamente interessante a substituição dos produtos derivados de petróleo (BARTH, 2003).

Além do emprego como combustível em caldeiras, em motores Diesel e em turbinas a gás para geração elétrica ou cogeração (BRAMMER & BRIDGEWATER, 2003), o tar pode ser usado na fabricação de produtos químicos, como combustível para meios de transporte e como fonte de hidrogênio (BRIDGEWATER, 2003). O processo de refino do tar para a obtenção de combustíveis para meios de transporte apresenta alto custo (GUST *et al*., 2003a).

A queima de combustíveis líquidos provenientes da biomassa em turbinas emite produtos que podem danificar a câmara de combustão (como metais alcalinos), fato quer deve ser corretamente prognosticado (LEDERLIN & GAUTHIER, 2003). Segundo KYTÖ *et al*. (2003), a câmara de combustão usada para queimar o tar deve apresentar certas diferenças em relação a uma câmara para combustíveis convencionais, como maior pressão na aspersão (devido à alta viscosidade), decorrente aumento na pressão da bomba (que deve ser de aço inoxidável, devido à presença de ácidos fórmico e acético no tar), necessidade de um combustível auxiliar para ignição (devido à presença de água) e mudança no volume da câmara (mudando o tempo de residência). O líquido produzido por pirólise rápida é menos caro que outros biocombustíveis líquidos; o custo de produção desses combustíveis é comparável ao valor do óleo mineral correspondente (SOLANTAUSTA *et al*., 2003).

3.2.3 Produto sólido

O produto sólido da pirólise é chamado de char, e consiste num resíduo com alto teor de carbono e uma pequena porcentagem de cinzas, podendo ser queimado ou usado na indústria química. Ele pode ser queimado visando a geração do calor necessário no processo com a passagem dos gases da combustão pelas paredes do

reator, como num trocador de calor tipo casco e tubo. Quando o calor da queima não é suficiente para atingir a temperatura de pirólise, o tar também pode ser queimado, ou ainda um combustível suplementar pode ser empregado.

O char pode ser usado na produção de carvão ativado ou como combustível de queima sem fumaça, sendo queimado em leito fluidizado sozinho ou com outros combustíveis (co-combustão) (ZABANIOTOU & KARABELAS, 2003). A produção de carvão ativado é baseada num processo de beneficiamento por gaseificação, favorecida pela presença de resíduos vegetais microscópicos (MACKAY & ROBERTS, 1984, citados por ECINAR *et al*., 1996).

Segundo ECINAR *et al*. (1996), o char pode ser considerado um produto químico cujas propriedades dependem de sua temperatura de formação, podendo ser empregado na indústria alimentícia e farmacêutica, não somente pelo baixo teor de enxofre e fósforo, mas também pela sua textura e reatividade. Geralmente, a máxima formação de char ocorre a baixa temperatura e baixa taxa de aquecimento.

3.3 PIROLISADOR

O equipamento utilizado para se realizar a pirólise é chamado de pirolisador. Ele é composto basicamente por um duto que leva as partículas de biomassa para o interior de um forno, onde atingem a temperatura de reação e liberam uma fumaça contendo os produtos gasosos e líquidos na forma de vapor. É um equipamento composto por uma parte de alimentação, uma parte de reação e uma parte de limpeza de gases, montados sobre uma base móvel.

A parte de alimentação consiste num tubo horizontal que recebe a biomassa de uma caixa localizada sobre um tubo de alimentação, dentro do qual, está localizado o parafuso responsável pela movimentação das partículas de biomassa para dentro do reator. A parte de reação contém o reator, o sistema de aquecimento e as saídas dos produtos sólidos (abaixo do reator) e gasosos + vapores (acima do reator). O reator é a parte mais importante por ser o lugar onde os produtos são gerados e consiste num cilindro horizontal rotativo, que recebe a biomassa pelo tubo de alimentação e a aquece até a temperatura de pirólise por resistências elétricas ao redor de suas paredes.

O movimento de rotação é produzido por um motor elétrico, transmitido ao reator através de correntes, que também é responsável pela movimentação do parafuso central, unido à parede interna do reator por uma chaveta.

Após decorrido o tempo de residência, os produtos da reação são gerados e precisam ser coletados. O char é movimentado pelo parafuso de alimentação até alcançar um tubo vertical localizado abaixo do reator, sendo coletado em um reservatório. Os gases produzidos são uma mistura de vapores do produto líquido e de syngas (parte incondensável), que sai do reator e se dirige à parte de limpeza de gases, que consiste num removedor de partículas sólidas e num lavador de gases (scrubber).

O removedor de sólidos é uma câmara responsável por fazer os gases provindos do reator diminuírem sua velocidade de escoamento pelo aumento da área da seção, além de passarem por chicanas de telas, onde ocorre uma perda do conteúdo sólido. Os gases livres de partículas sólidas são enviados ao scrubber, para a retirada dos líquidos condensáveis.

O scrubber consiste num cilindro vertical onde existe uma quantidade de água no fundo para receber os gases. A saída do tubo por onde chegam os gases é abaixo do nível da água no scrubber, de modo que os gases que saem do tubo encontram a água e perdem calor neste processo. Eles se encaminham para a superfície da água enquanto algumas substâncias começam a se condensar e a se acumular numa camada na superfície da água. Ao deixar a superfície d'água, os gases encontram uma ducha de um sistema de aspersão que circula a água do fundo do scrubber, além de uma série de pratos feitos de uma tela metálica, usados para aumentar a turbulência e troca de calor e massa entre os gases e a água. Um sistema de resfriamento, usado na água do scrubber para garantir o resfriamento dos gases que entram, é construído usando água num ciclo fechado com uma bomba, um ventilador e um trocador de calor. A água do scrubber recebe então continuamente uma quantidade de tar que se acumula em sua superfície e que deve ser retirada. Portanto, um tubo lateral é responsável pela coleta deste produto e o leva para um reservatório, dotado de um tubo transparente externo para se averiguar o nível do líquido. O esquema do scrubber é apresentado na Fig. A.1. Eventualmente a água do scrubber deve ser trocada devido à saturação da solução aquosa formada. Um esquema do equipamento inteiro é mostrado na Fig. 3.4.

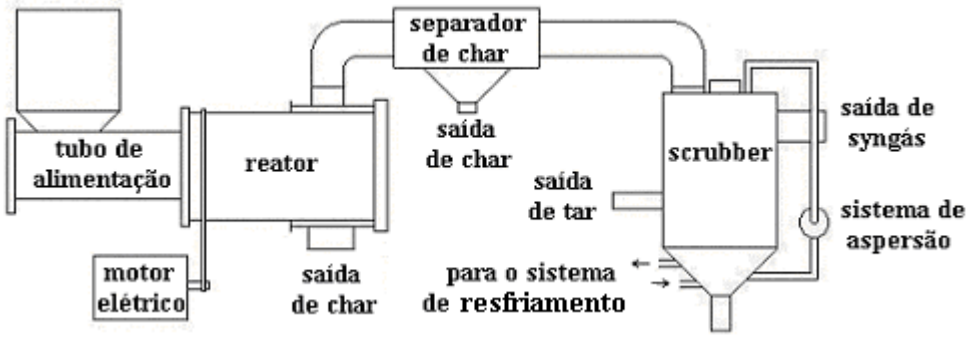


Figura 3.4: Esquema do sistema completo de pirólise.

O processo é altamente eficaz no que diz respeito à possibilidade de se destinar os resíduos agrícolas para a geração de produtos de valor comercial, gerando energia limpa e renovável, de forma sustentável. O grande problema é que equipamentos de pequena escala ainda apresentam baixa eficiência devido às dificuldades de construção e do emprego dos produtos da pirólise para geração elétrica abaixo de 500 kW.

Um fato importante é o custo inicial para a construção de um pirolisador, visto que é uma tecnologia recente e não existem padrões específicos para o projeto destes equipamentos. Portanto, o pirolisador requer um sistema de instrumentação e controle de velocidade e temperatura confiáveis, assim como uma manutenção especializada. É importante garantir a segurança do local do equipamento com relação a incêndios e contaminação química do ar, devido às emissões de CO, CH_4 e H_2, que são gases inflamáveis e com características tóxicas.

CAPÍTULO 4
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

4.1 PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A matéria orgânica pode ser decomposta em ambiente aeróbio ou anaeróbio. Em meio aeróbio são formados CO_2 e uma substância quimicamente estabilizada; em meio anaeróbio, formam-se CO_2, CH_4 e a mistura estabilizada (BHATTACHARYA *et al.*, 1997). Segundo LASTELLA *et al*. (2002), alguns materiais orgânicos podem ser degradados por microorganismos, sendo convertidos em uma mistura composta por matéria orgânica de alto poder fertilizante; e uma mistura de gases de alto valor energético (biogás), num processo conhecido como biodigestão anaeróbia que ocorre num reator de construção simples e de fácil operação.

O processo de biodigestão anaeróbia consiste na decomposição de resíduos orgânicos num ambiente livre de oxigênio. Se restos de folhas e frutos estiverem na ausência de ar e na presença de água, as bactérias encontram boas condições para se alimentarem da matéria orgânica complexa, liberando substâncias mais simples (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 1980). De acordo com a COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS - CAEEB (1981), o processo pode ser dividido em três fases:

- A primeira fase é a fermentação ácida, quando os carboidratos são decompostos em ácidos gordurosos de baixo peso molecular e ácidos acético, butírico e propiônico.

- A segunda fase é a regressão ácida, quando ocorre a decomposição de ácidos orgânicos e compostos nitrogenados solúveis, formando amônia, aminas, carbonatos ácidos e pequenas quantidades de dióxido de carbono, ácido sulfídrico, nitrogênio, metano e hidrogênio e mercaptanas.

- A terceira fase é a fermentação alcalina, quando ocorre a destruição completa de celuloses, compostos nitrogenados e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que são transformados em dióxido de carbono e metano.

Para que ocorra a ação das bactérias anaeróbias, necessita-se de um meio rico em carbono (como fonte de energia) e em nitrogênio (para a formação celular e reprodução). Se o teor de nitrogênio na biomassa for muito baixo, a multiplicação bacteriana será muito lenta e a produção de biogás será muito baixa. Por outro lado, se o teor de nitrogênio na biomassa for muito alto, haverá grande produção de amônia, fazendo com que diminua a concentração de metano no biogás. A quantidade ótima de carbono na biomassa necessária ao bom desempenho das bactérias é 30 vezes maior que a de nitrogênio (em massa). Portanto a relação carbono/nitrogênio (C/N) da biomassa é um dos índices que caracterizam a produtividade de biogás (MACINTYRE, 1996). A Tabela 4.1 mostra esta relação para dejetos de diferentes origens (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 1980).

Tabela 4.1: Relação C/N em massa para dejetos de diferentes origens.

Origem	C/N
Bovina	18
Eqüina	25
Suína	15
Avícola	15
Humana	8

Quando os dejetos possuem baixa relação C/N, é conveniente acrescentar galhos, folhas e frutos como fonte de carbono, de modo a manter a relação perto de 30 (CAEEB, 1981).

A ação das bactérias ocorre somente sobre os sólidos voláteis (SV), parte suscetível à decomposição, que representa a parte queimada durante a incineração de uma amostra. Os sólidos fixos (SF) são representados pela massa que resulta após a incineração, correspondente à parte incombustível, ou seja, cinzas. A soma dos SV

com os SF gera os sólidos totais (ST) ou matéria seca (MS), que é a massa de uma amostra após ser removida toda a umidade da mesma (MACINTYRE, 1996).

Para aumentar a produção de biogás, é preciso otimizar as condições para que ocorram as reações precursoras da metanogênese e as próprias reações metanogênicas. Ao mesmo tempo, a produção de dióxido de carbono, nitrogênio e outros gases que diluam o potencial energético do biogás deve ser minimizada (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996).

A matéria orgânica a ser fermentada pode ser uma mistura de resíduos rurais e agrícolas, industriais e urbanos com água, adicionada para garantir a atividade dos microorganismos e a fluidez da massa no biodigestor. A matéria deve permanecer durante um certo tempo no reator, chamado tempo de retenção hidráulica (TRH). Os resíduos rurais são constituídos por resíduos animais e vegetais. Os resíduos animais são provenientes do manejo destes animais, como bovinos, eqüinos, suínos e aves. As características dos dejetos de animais sugerem a aplicação de uma tecnologia que combine a redução do potencial poluidor do material com sua utilização energética (BAYKOV *et al*., 1995). Os resíduos vegetais são representados pelos resíduos agrícolas, como restos de culturas. No caso de resíduos de origem vegetal, o principal propósito da biodigestão anaeróbia de restos de frutas e outros vegetais é o tratamento deste resíduo, embora também seja feita a recuperação da mistura gasosa resultante, utilizada como combustível (LASTELLA *et al*., 2002). Os resíduos industriais passíveis de biodigestão são provindos geralmente de indústrias alimentícias, cervejarias, estações de tratamento de efluentes industriais, etc. Com relação ao resíduo urbano, podem ser processados o lixo orgânico e o esgoto sanitário. O processo de biodigestão anaeróbia da fração orgânica do resíduo sólido urbano contribui para a geração renovável de energia e reduz sua deposição (KIELY *et al.*, 1997).

A aplicação do processo visa a utilização dos resíduos, de modo a evitar que possam gerar algum tipo de contaminação, ou seja, é criada uma finalidade para um material muitas vezes problemático para o local onde é produzido. A aplicação destes resíduos gera um efluente líquido de baixa DBO (demanda bioquímica de oxigênio), que indica a capacidade que a matéria possui para absorver oxigênio do meio em que

se situa. Ao lado das energias renováveis solar, eólica e hidráulica, a tecnologia do biogás tem sido observado como uma fonte de energia confiável, que pode ser produzida com resíduos agrícolas e animais em vários países do mundo (HAMMAD *et al.,* 1999). Reconhece-se que o emprego desta tecnologia resulta não somente na produção de biogás e biofertilizante, mas também em benefícios sociais e ecológicos (NI & NYNS, 1996); sendo aplicado em regiões rurais, representando ainda uma fonte de empregos para a população local (OTHMAN *et al.,* 1996).

4.2 PRODUTOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Os produtos do processo de biodigestão anaeróbia são um efluente líquido contendo restos sólidos do resíduo inicial e uma mistura gasosa com poder calorífico.

4.2.1 Efluente líquido

O efluente líquido é um material já bioquimicamente estabilizado que não tem odor e apresenta pouco potencial poluidor quando comparado à matéria inicial. Tendo sofrido ação bacteriológica, este efluente é solúvel, rico em nutrientes e livre de muitos agentes transmissores de doenças (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 1980). Esse material pode ser usado como fertilizante devido à sua capacidade de destruir muitos parasitas e agentes patogênicos, fazendo com que a produção deste constitua uma vantagem adicional no emprego da biodigestão em propriedades rurais (MACINTYRE, 1996).

O biofertilizante é mais rico em nitrogênio que os fertilizantes comuns, apresentando como principais vantagens o melhoramento do solo (resultando em maior retenção de água e penetração de ar) e a introdução de minerais necessários à planta e de microorganismos que aumentam sua velocidade de assimilação de nutrientes (CAEEB, 1981). A aplicação no solo do biofertilizante gerado por biodigestão anaeróbia de cama de frango pode suprir as necessidades de N, P, K, Fe, Cu, Co, Mn, Mg, Ca e húmus (PATEL & PATEL, 1971, citados por SANTOS, 1997).

O efluente líquido da biodigestão deve sofrer um tratamento, conforme sugerido pela UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG (1997), caso ele não seja usado ou vendido. Este tratamento visa adequar o efluente tratado aos requisitos da legislação ambiental e propiciar a proteção dos cursos d'água receptores dos lançamentos, fazendo a remoção de material orgânico não totalmente eliminados pela biodigestão, como agentes patogênicos. Tem sido apresentada uma baixa eficiência de remoção de coliformes em reatores anaeróbios, além de vírus e protozoários. Para o tratamento do efluente líquido (em caso de despejo em rios), pode-se utilizar uma lagoa de polimento, usada para tratar qualquer tipo de efluente, em termos de remoção de patogênicos e nutrientes. Ela é feita com pouca profundidade de modo a permitir uma maior penetração de luz solar (permitindo uma maior incidência de raios ultravioleta), aumentando a produção de oxigênio pelas algas (aumentando o pH do meio), o que atuam como fatores adversos à vida de tais microorganismos. O TRH do efluente na lagoa é da ordem de dias; um exemplo citado pela UFMG (1997) mostra uma lagoa de 20.000 m^3 com tempo de retenção hidráulica de 23 dias.

4.2.2 Biogás

O gás gerado por esse processo é chamado biogás, que é uma mistura de metano e dióxido de carbono, que representam 90 % em volume do biogás. A outra parcela (10 %) é tipicamente formada por gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio molecular (N_2), hidrogênio molecular (H_2), metil-mercaptanas (CH_3SH), água (H_2O), amônia (NH_3), entre outros (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996). As concentrações dos constituintes do biogás dependem da natureza do resíduo digerido e do tipo de tratamento anaeróbico utilizado, mas pode-se considerar que o biogás possui características similares ao GLP (GOVERNO DE PERNAMBUCO,1980). O biogás não é venenoso e pode ser usado para cozimento, iluminação e aquecimento, além de refrigeração e geração elétrica (com motores de combustão) (MACINTYRE, 1996).

Ao sair do reator, o biogás pode ser usado diretamente para queima em queimadores e motores, embora existam certos componentes que se forem retirados

causam uma melhora nas condições de uso do biogás. Estas substâncias são basicamente o CO_2, o H_2S e a umidade, que podem ser retiradas por meio de processos simples e de baixo custo. Segundo GOVERNO DE PERNAMBUCO (1980), para a retirada de CO_2 do biogás, basta faze-lo borbulhar em uma solução de água e cal, a uma concentração de 80:1 (em massa). Este procedimento diminui sensivelmente a concentração de CO_2 do biogás, aumentando o seu poder calorífico. De acordo com a CAEEB (1981), para se retirar o H_2S do biogás, deve-se fazer com que ele passe por um tubo contendo óxido de ferro, que se converte em sulfeto de ferro e, novamente em óxido de ferro por exposição ao ar ou mediante tratamento térmico. Pode-se também faze-lo borbulhar numa solução de soda cáustica (30%), contendo um pouco de sulfato de cobre ($CuSO_4$). A umidade do gás pode ser retirada fazendo-o passar por um tubo de cloreto de cálcio ($CaCl_2$), sendo este posteriormente recuperável com a eliminação da água absorvida por evaporação ou aquecimento.

De acordo com U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (1996), existem certas características importantes a serem observadas na utilização do biogás, devido à presença de vários constituintes não-combustíveis, como a velocidade de chama, variações nos limites de flamabilidade, temperatura de chama e poder calorífico, além do problema de possuir uma composição variável. O biogás pode ser usado na combustão direta (para geração de vapor, aquecimento, secagem, refrigeração), em motores (para obtenção de energia mecânica, cogeração, uso veicular) e em turbinas a gás e células de combustível.

Uma das aplicações mais simples do biogás é a combustão direta, geralmente empregando equipamentos modificados, originalmente projetados para outros combustíveis (GLP ou gás natural). Nestes casos, vários fatores devem ser observados, como o menor poder calorífico do biogás (influindo na quantidade de gás que deve ser queimado), na estabilidade da chama (envolvendo a pressão do escoamento e a velocidade de saída do biogás pelo orifício do queimador) e a presença de H_2S (restringindo a temperatura de exaustão dos gases de combustão a um limite mínimo de 122 ºC, evitando-se a formação de ácidos e de incrustações no equipamento). No caso de flares, estes são empregados geralmente quando não existe um sistema de

aproveitamento do biogás produzido, ou quando este não é suficiente para utilizar toda a produção, gerando um excedente que deve ser descartado de maneira conveniente.

No uso do biogás em sistemas a vapor, é necessário que se realize modificações apenas na caldeira, preservando todo o restante do sistema da contaminação química dos componentes do combustível. De acordo com U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (1996), este tipo de aplicação serve como fonte de energia para várias outras, como o aquecimento de ambientes e secagem (que podem ser realizados não somente com vapor, mas também com a combustão direta do biogás, requerendo algum tipo de purificação inicial) e o aquecimento e resfriamento por absorção (permitindo também o emprego de combustão direta).

O emprego do biogás em motores de combustão interna requer uma adaptação dos equipamentos para receber o novo combustível, de menor poder calorífico. É aconselhado que se mantenha disponível uma certa quantidade do combustível original de modo a facilitar a partida e a suprir as necessidades do sistema no caso de falta de biogás. Os motores a gás natural são os mais adaptáveis ao uso do biogás, devido à similaridade entre estes combustíveis quando comparado, por exemplo, à gasolina (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996). Os motores Diesel também podem ser acionados com biogás, embora várias modificações devam ser feitas, como no carburador e no sistema de injeção (STAHL, 1983, citado por U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996).

4.3 BIODIGESTORES

O biodigestor é o local onde ocorrem as reações do processo de biodigestão. Ele consiste num cilindro vertical enterrado no chão e uma tampa para reter o biogás produzido. Os biodigestores podem ou não possuir sistemas para aquecimento ou agitação da mistura. Mostra-se que o uso da energia solar para aquecimento da mistura no biodigestor diminui o TRH (TIWARI *et al*., 1996).

Os biodigestores para fermentação de resíduos rurais podem ser de vários tipos. Em geral os biodigestores classificam-se em de pressão constante e de pressão variável. Nos biodigestores de pressão constante há uma variação do volume interno,

enquanto que o de pressão variável mantém seu volume inalterado e a pressão depende da relação entre produção e consumo de biogás (SINGH *et al*., 1998). Dentre os modelos para o tratamento de dejetos de animais, os mais comuns são o indiano, o chinês e o batelada.

4.3.1 Modelo indiano

O modelo indiano consiste basicamente num cilindro vertical feito de tijolos, com uma tampa metálica flutuante, fazendo dele um biodigestor de pressão constante. Ele fica verticalmente enterrado no chão e possui uma parede interna que o divide ao meio longitudinalmente. Em uma metade é conectado o tubo de entrada da mistura, e a outra metade igualmente responsável pela saída. Como mostra a Fig. 4.1, o cilindro é feito de tijolos com fundação, revestido internamente de cimento e eventuais produtos impermeabilizantes.

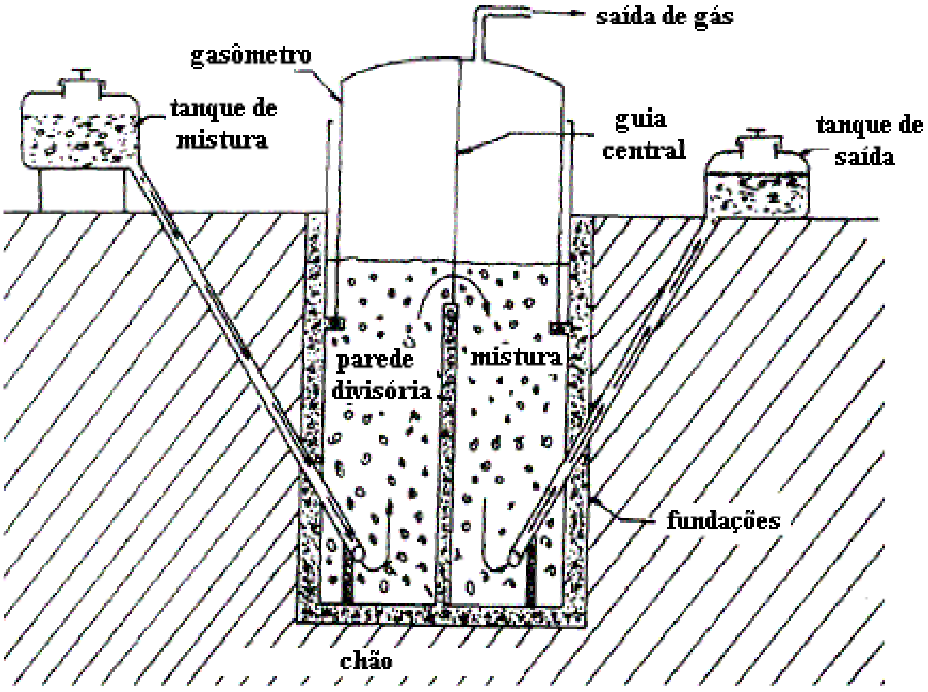


Figura 4.1: Biodigestor modelo indiano (TIWARI *et al*., 1996).

O fluxo se faz pela perda de densidade da mistura no processo; a porção que entra vai para o fundo do digestor, perde massa (gases) e tende a flutuar e cair na outra metade. Para que o gás não escape, na parte superior do digestor existe um canal

anular com água onde se encaixa a campânula de metal, que flutua nesse selo d'água e tem a possibilidade de subir e descer, sendo segura por tubos guia (no centro e/ou lateralmente), mantendo a pressão aproximadamente constante com a variação do volume. O tanque de mistura é onde a mistura é feita, com os dejetos e água, onde ele permanece por no mínimo 24 horas para tratamento aeróbio prévio (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 1980).

4.3.2 Modelo chinês

O biodigestor modelo chinês se caracteriza por não possuir gasômetro, sendo que o gás gerado é armazenado dentro do reator, caracterizando-se um biodigestor de pressão variável. A unidade, construída com materiais de baixo custo e de fácil aquisição, fica totalmente enterrada no chão, o que aumenta a temperatura da mistura, melhorando a produção de biogás (CAEEB, 1981). O substrato entra na câmara e se iniciam as reações, ocorrendo um aumento da pressão sobre o líquido, que diminui com o consumo do biogás. Um biodigestor modelo chinês é mostrado na Fig. 4.2.

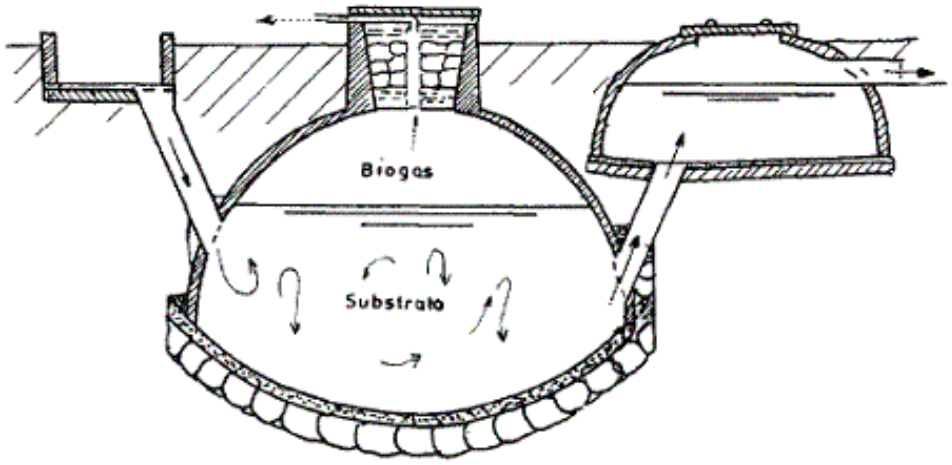


Figura 4.2: Biodigestor modelo chinês (MLAOUHI *et al*., 1996).

4.3.3 Modelo batelada

O biodigestor tipo batelada é um modelo simples, que consiste simplesmente num reservatório onde se introduz o substrato, que é fechado durante todo o tempo de residência e só é aberto para se retirar o efluente e se introduzir uma nova carga. A tampa do biodigestor é o gasômetro que também se desloca verticalmente, variando o volume interno, como mostra a Fig. 4.3.

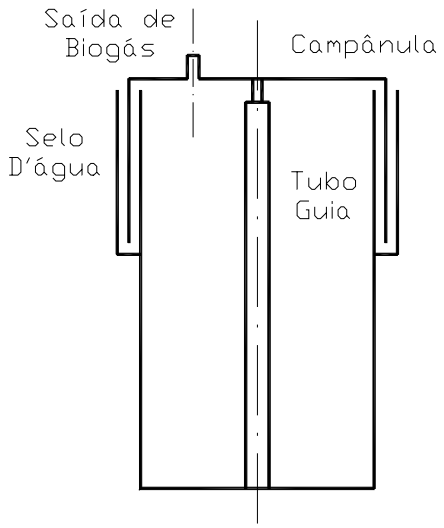


Figura 4.3: Biodigestor modelo batelada.

O biodigestor modelo batelada pode não ter uma campânula flutuante, sendo neste caso de pressão variável.

Com isso, o processo de biodigestão apresenta-se como uma alternativa de aproveitamento energético de material orgânico de construção e operação simples, significando menores investimento inicial, custo de operação e de manutenção, sem contar nos benefícios oriundos do tratamento deste material residual. Um dos campos mais importantes da utilização do gás de tratamento anaeróbio é o estudo termodinâmico da transformação da energia do biogás em energia mecânica, de maneira econômica e eficiente (HENHAM & MAKKAR, 1998).

Unidades de produção de biogás em pequena escala para propriedades rurais apresentam-se como uma opção atraente principalmente para localidades não beneficiadas por redes de transmissão (ABURAS *et al.*, 1996). A baixa expectativa de eletrificação destes lugares viabiliza a implantação de unidades pequenas para suprir ao menos a iluminação (JASH & BASU, 1999). Portanto, a utilização do biogás ajuda a diminuir o consumo de combustíveis fósseis, a controlar os níveis de poluição e a difundir o acesso à eletricidade (MANDAL & MANDAL, 1997)

CAPÍTULO 5
ANÁLISE TÉCNICA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo se refere à análise de uma alternativa tecnicamente viável para se transformar a energia da matéria orgânica inicial na forma de energia desejada no local, geralmente elétrica e/ou térmica. Com relação à geração da energia inicial, deve ser encontrada uma maneira de se retirar a energia da biomassa para que esta possa ser aproveitada num sistema de cogeração. De acordo com as alternativas apresentadas nos capítulos 3 e 4, devem ser feitas algumas considerações importantes na escolha da melhor tecnologia.

O capítulo 3 mostra a pirólise como um meio de transformação da biomassa em produtos sólidos, líquidos e gasosos com poder calorífico, que ocorre num reator quase na ausência de oxigênio. Várias pesquisas mostram experimentos aplicando diferentes tecnologias de construção do pirolisador, fazendo com que este não seja um equipamento disponível para ser comprado em pequena escala (produto de prateleira). Portanto, ele deve ser construído empregando algumas das tecnologias usadas por pesquisadores em unidades de laboratório e, por conseqüência, tornando dificil a estimativa de seu custo de construção e manutenção. Também deve ser construído todo o sistema para a separação dos produtos da pirólise, de modo a fornecer os produtos sem mistura uns com os outros. Destes produtos, o syngas e o char podem ser queimados diretamente, ao contrário do tar, que necessita de tratamento químico prévio.

O capítulo 4 mostra a biodigestão anaeróbia, um processo de degradação microbiológica da matéria orgânica em biogás e um fertilizante líquido, na ausência de oxigênio. A tecnologia de construção dos biodigestores é conhecida pela facilidade e pelo baixo custo, sendo de fácil operação e manutenção. O processo é espontâneo e não requer equipamentos auxiliares para que ocorra, mas estudos mostram que um sistema de aquecimento (quando necessário) e um de agitação fazem com que aumente

a produção de biogás, que pode ser facilmente tratado para a utilização em motores e queimadores. Além disso, resta o efluente líquido de poder fertilizante, que pode ser empregado diretamente no solo.

Com isso deve-se escolher, dentre as duas, a alternativa que melhor atenderia a área rural, sendo esta geralmente constituída por pequenas comunidades ou propriedades rurais. De acordo com BRIDGEWATER & GRONLI (2003), para uma planta de pirólise ser economicamente viável, devem ser consumidos no mínimo 100 t/h de biomassa, devido à necessidade de se dispor de uma grande área de troca de calor entre os gases da combustão dos subprodutos (tar e char) e o reator, tornando este um dos pontos mais críticos no dimensionamento deste tipo de sistema. O processo de pirólise é ainda uma tecnologia em desenvolvimento, apresentando certas dificuldades na construção do equipamento frente às mais diversas tecnologias empregadas em protótipos de laboratório, conforme mostram DEMIRBAS (2001), ECINAR *et al.* (1996), LI *et al.* (1999), MIRANDA *et al.* (2003), ZABANIOTOU & KARABELAS (2003) e SUN *et al.* (2003). O controle do processo, de modo a oferecer acesso a mudanças nas variáveis do processo, como temperatura, taxa de aquecimento, vazão, que deve apresentar confiabilidade nos valores medidos, e a dificuldade de se obter conhecimentos teóricos para a otimização do processo, valores de custos do equipamento, de operação e de manutenção, tornam o processo de pirólise pouco aplicável na área pretendida, tratando-se de localidades sem eletrificação e pequenos produtores rurais, quando comparada à biodigestão anaeróbia.

5.2 PROPOSTA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Comparando os dados observados, pode-se dizer que a aplicação da biodigestão anaeróbia apresenta uma maior facilidade de construção, operação e manutenção de um sistema em pequena escala, visando atender localidades isoladas e pequenas propriedades rurais. O processo se aplica principalmente em locais onde se efetue a criação de animais, ou seja, onde se precisa de um destino para o material gerado na atividade.

Pode-se dizer que um dos principais benefícios da aplicação da biodigestão anaeróbia na avicultura de corte é a destinação dos dejetos gerados na atividade, combinada com a geração de energia e o decorrente beneficiamento da propriedade ou pequena comunidade local. Deve-se ressaltar a grande importância do estudo, projeto, aplicação, operação e manutenção desse tipo de tecnologia, além de educar a população local, contribuindo para o desenvolvimento humano de comunidades rurais. Pode-se considerar que o processo de biodigestão, além de permitir o aproveitamento energético do rejeito orgânico, faz com que este não seja lançado nas fontes de água. Isto é, o emprego da biodigestão na geração de energia também evita a poluição de fontes de água, ajudando a manter a saúde da população em questão.

De acordo com o sistema de funcionamento da avicultura de corte, o material orgânico residual gerado (cama de frango) pode ser empregado num processo de biodigestão anaeróbia, gerando assim o biogás que alimentaria o sistema de geração e o fertilizante, usado em uma cultura própria (se possível) ou comercializada. A Figura 5.1 mostra os fins à que serão encaminhados os produtos do processo.

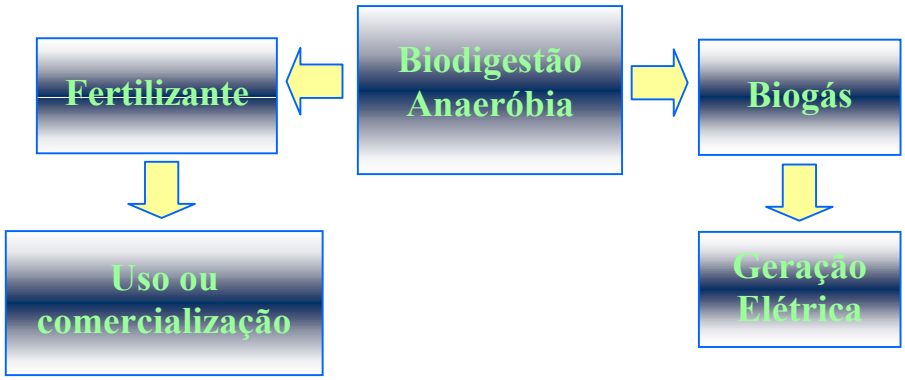


Figura 5.1: Esquema de utilização dos produtos da biodigestão.

Conforme já mencionado, pretende-se empregar a tecnologia da biodigestão na avicultura de corte, de modo a converter os resíduos numa fonte energética, e com isso gerar energia útil (eletricidade e/ou calor), para se realizar o condicionamento térmico dos galpões. Para tal, deve-se determinar a quantidade de energia que pode ser gerada com a cama produzida nos galpões, de modo a se conhecer as potências elétrica e térmica que podem ser obtidas. Posteriormente determina-se a quantidade de energia a

ser retirada dos galpões com o cálculo de carga térmica, a partir das características do galpão e o número de aves. Por último é feito o dimensionamento do sistema de condicionamento térmico, determinando a quantidade de energia requerida neste processo, obtendo-se o sistema mais adequado às necessidades e disponibilidades energéticas locais.

5.2.1 Dimensionamento do sistema de cogeração

Os cálculos desta seção visam a determinação da quantidade de energia que pode ser retirada da matéria orgânica, e se dividem em três partes: a determinação da quantidade de energia que pode ser obtida na forma de biogás, a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada com este biogás e a quantidade de energia térmica que pode ser recuperada no processo de cogeração.

5.2.1.1 Determinação da energia disponível

Deve-se inicialmente saber a quantidade de biomassa que pode ser obtida e sua capacidade de geração de biogás, quando submetida ao tratamento anaeróbio. A composição da biomassa depende do material inicial, da densidade populacional adotada, da duração do ciclo e tempo de armazenagem, além de fatores de manejo, ambientais e fisiológicos (SANTOS, 1997).

Para saber as condições desta biomassa, devem ser consideradas condições contidas em material bibliográfico, relatando experimentos de geração de biogás com biodigestão de cama de frango. SANTOS (2001) analisou alojamentos de aves de corte alojadas em lotes com valores médios de densidade populacional de 14 aves/m^2 e tempo de retenção da cama no lote de 48 dias, obtendo uma cama com 23% de umidade, com uma produção média de 1,37 kg de sólidos totais (kg_{ST}) por ave. SANTOS (1997) estudou a biodigestão de cama de frango, obtendo entre 0,17 e 0,27 de m^3 de biogás por kg_{ST} de cama de frango; SANTOS (2001) obteve valores entre 0,14 e 0,29 m^3/kg_{ST} e cita MAHADEVASWAMY & VENKATARAMAN (1986), que obtiveram uma média de 0,54 m^3/kg_{ST}, JAMILA (1990), que obteve entre 0,2 e 0,4

m^3/kg_{ST} e LUCAS JR *et al.* (1993,1996), que obtiveram entre 0,25 e 0,29 m^3/kg_{ST}, podendo-se adotar o valor de 0,3 m^3 de biogás por kg_{ST} de cama de frango. Com estes dados, pode-se determinar a quantidade do biogás produzido na biodigestão da cama produzida por cada ave, resultando em 0,4 m^3/ave.

Como o biogás é formado na temperatura do ambiente local (considerada 31 ºC) e na pressão interna do biodigestor (1,42 kPa ou 150 mm.c.a., valor dentro do intervalo sugerido por AMESTOY & FERREYRA, 1987, citados por SANTOS, 2001), deve-se fazer uma correção do volume gerado para as CNTP. De acordo com CAETANO (1985), citado por SANTOS (2001), com a análise do fator de compressibilidade do biogás, observou-se que este possui um comportamento próximo ao ideal, permitindo a aplicação da Lei de Boyle (VAN WYLEN *et al.*, 1997), mostrada na Eq. 5.1.

$$\frac{P_1.V_1}{T_1} = \frac{P_2.V_2}{T_2} \tag{5.1}$$

Portanto, com as condições de geração do biogás de temperatura e pressão, pode-se corrigir o volume de biogás gerado em relação às CNTP. O valor da pressão atmosférica foi considerado 94,66 kPa (0,934 atm; 710 mmHg), medido na cidade de Guaratinguetá – SP, resultando num volume corrigido de 0,34 Nm^3/ave.

Deve-se então fazer algumas considerações a respeito da granja, como o número de aves e de galpões, assim como informações sobre sua construção. Considera-se então uma granja de frangos de corte hipotética constituída por quatro galpões, gerando cama de frango como material residual. O esquema de funcionamento dos galpões é de 48 dias de criação e 16 dias de limpeza e desinfecção.

Os galpões são construídos com o sentido longitudinal na direção leste-oeste, sendo que as faces correspondentes a estas direções são compostas por paredes fechadas e feitas de alvenaria com 20 cm de espessura e uma porta dupla (duas portas de 90 cm X 210 cm cada, lado a lado) em cada, diminuindo assim a entrada de calor. As paredes das faces norte e sul são em alvenaria com 20 cm de espessura e de 40 cm de altura, sendo o restante da altura composto por uma tela de metal coberta por uma cortina plástica removível. Isto ajuda na ventilação natural e possibilita o fechamento

das cortinas em caso de chuvas e incidência direta de raios solares. O galpão será considerado com 10 m de largura e 50 de comprimento, além dos 3,5 m de pé direito. Um esquema da seção transversal do galpão considerado é mostrado na Fig. 5.2.

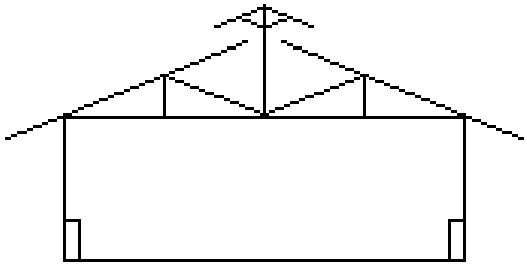


Figura 5.2: Esquema da seção transversal do galpão de frangos.

Portanto dispõe-se de 500 m^2 de área no piso, que podem ser divididos em 5 lotes de 100 m^2, contendo 1400 aves em cada, totalizando 7000 aves/galpão, totalizando 2380 Nm^3/galpão, no período de 48 dias.

Para se preparar a mistura a ser digerida, muitos autores recomendam a adição de inóculo (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 1980, SANTOS, 1997, 2000), que é o efluente líquido de um ciclo de biodigestão anterior, adicionado à mistura para aumentar a produção de biogás. A mistura a ser introduzida no biodigestor deve ser preparada em média com uma mistura de água, cama e inóculo, respectivamente numa proporção de 6:1:2,5, com base na pesquisa de SANTOS (2001). A cama a ser adicionada é a cama final (com 23 % de umidade), formada a uma razão de 1,78 kg_{CAMA}/ave, obtendo-se um valor de 12460 kg de cama, gerada pelas 7000 aves do galpão, nas condições especificadas. Portanto, a mistura a ser fermentada é constituída pelos 12460 kg de cama, 74760 kg de água e 31150 kg de inóculo, o que resultaria aproximadamente num volume final de 120 m^3.

De acordo com sugestões feitas por ORTOLANI *et al.* (1991), citado por SANTOS (1997), com relação à natureza periódica da disponibilidade da matéria orgânica (e não diária, como na criação de bovinos e suínos), o tipo de biodigestor que melhor se encaixa para tal situação seria o modelo batelada, operando em baterias, de modo a possibilitar um melhor aproveitamento energético do processo de fermentação da cama, caracterizado por ser um processo lento. Devido ao grande volume da

mistura a ser digerida, optou-se por empregar um grupo de três biodigestores tipo batelada de 40 m^3 cada ao invés de um biodigestor de 120 m^3, de modo que todos os três biodigestores do grupo de receberiam os dejetos do galpão no mesmo dia, totalizando os 120 m^3. Mas a produção de biogás não é constante durante o TRH; o volume de biogás produzido é crescente até aproximadamente o 16º dia, quando começa a diminuir até um valor próximo de zero no 48º dia. Portanto, será considerada uma produção de biogás média, correspondente ao volume total de biogás gerado no período, dividido pelo número de dias deste período, resultando em 49,6 Nm^3/dia, por grupo de biodigestores.

Os quatro galpões são abastecidos com cama nova a cada 64 dias, permanecem com as aves durante o tempo de criação de 48 dias e mais 16 dias de vazio sanitário para limpeza e desinfecção, completando o ciclo. Os galpões recebem a cama com uma diferença de 16 dias entre eles, disponibilizando regularmente uma quantidade conhecida de cama a cada 16 dias por um galpão diferente. Pretende-se com isso empregar os três grupos de biodigestores para lidar com a cama produzida, cada grupo recebendo abastecimentos intercalados de acordo com a disponibilidade de cama (a cada 16 dias) e operando com um TRH de 48 dias. O esquema da granja é mostrado na Fig. 5.3.

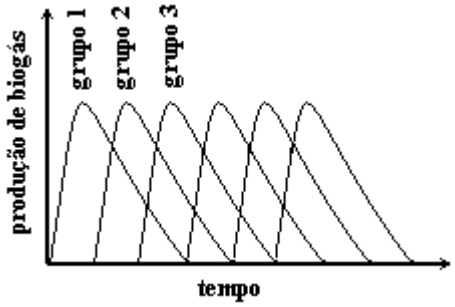


Figura 5.3: Esquema dos abastecimentos intercalados dos grupos de biodigestores.

O abastecimento intercalado dos biodigestores faz com que a produção do biogás possa ser aproximada a um valor constante, ao invés de ser considerada cíclica. Como os grupos são ligados entre si pela mesma linha de coleta de biogás, pode-se considerar uma produção diária média de 148,8 Nm^3/dia, produzidos com os três grupos operando conjuntamente.

5.2.1.2 Geração elétrica.

Com o valor da produção média diária do biogás, pôde-se determinar sua quantidade de energia. SILVEIRA (1994) mostrou uma análise do comportamento do motor TOTEM (15 kW) operando com biogás de duas concentrações diferentes de metano, como mostra a Tab. 5.1.

Tabela 5.1: Balanço energético para o motor TOTEM.

	Concentração de CH_4	
	62%	**79%**
PCI [kJ/Nm^3]	22600	29031
Consumo [Nm^3/h]	8,33	6,51
Potência [kW$_{el}$]	13,8	11,5

O sistema de condicionamento deve operar durante os dias mais quentes do ano, e nos horários mais quentes do dia, considerando-se um dia normal de funcionamento como um dia de verão, operando das 9:30 às 19:30 horas, devido ao fato de serem dias longos e pelo horário de verão. Portanto, dispõe-se de 148,8 m^3 de biogás produzidos diariamente para serem consumidos durante as 10 horas de operação (148,8 Nm^3/10 h = 0,004 Nm^3/s).

De acordo com os valores obtidos por SANTOS (2001), o biogás produzido apresentou concentrações médias de metano e dióxido de carbono respectivamente iguais a 64,3 e 30,6 %; o autor ainda cita YAO *et al.*, (1989), obtendo 65,4 % de metano, WEBB & HAWKES (1985), que obtiveram 59 % de metano e JAMILA (1990), que obteve teores de metano entre 44,8 e 73,9 %, podendo ser adotada uma média de 62 % de metano e 38 % de dióxido de carbono. Esta concentração de metano no biogás permite a utilização do poder calorífico inferior apresentado por SILVEIRA (1994), equivalendo a 22600 kJ/Nm^3. Com a vazão de biogás e seu poder calorífico, podem ser obtidos 90,4 kW, na forma de potência suprida pelo combustível.

De acordo com SILVEIRA (1994), a eficiência (η) de um motor TOTEM funcionando com biogás variou entre 24 e 29 %, conforme varia a concentração de metano no gás, adotando-se um valor de 26 %. Sendo este valor considerado válido para ser aplicado em outros motores, a potência desenvolvida por um motor que consuma o biogás gerado pode atingir aproximadamente 23,5 kW (31,5 hp). Isto permite a adoção de uma unidade de 30 kW do fabricante Trigas, que produz equipamentos para biogás. A potência elétrica pode ser estimada aplicando-se a eficiência do gerador elétrico (considerada η_{ger} = 89 %, conforme DEL TORO, 1999), resultando em 21 kW.

5.2.1.3 Geração térmica

Para se determinar a quantidade de calor que pode ser aproveitada no sistema, pode-se considerar duas fontes térmicas: a água do sistema de arrefecimento do motor e os gases de exaustão.

O sistema de arrefecimento é um ciclo fechado, incluso nas unidades comercialmente disponíveis, e o aproveitamento térmico neste ponto seria baseado na substituição do radiador deste ciclo por um trocador de calor, gerando desta forma ar quente para uso no pinteiro, local que necessita de aquecimento para a obtenção das condições de conforto dos pintos. A vazão de água pode ser obtida interpolando-se os valores de SILVEIRA (1994), que analisou a vazão de água no sistema de arrefecimento do motor com relação à sua potência, como mostra a Tab. 5.2.

Tabela 5.2: Relação entre a potência do motor e a vazão de água de refrigeração.

Potência [kW]	**Vazão [m^3/h]**
7	1,8
15	2,0
55	5,7
85	11,3
125	16,6

Com as propriedades da água retiradas da Tab. A.1, pode-se obter a massa específica (ρ = 997 kg/m^3) para o cálculo da vazão mássica da água (0,94 kg/s) e o calor específico (c_p = 4,184 kJ/kg.K) no cálculo da quantidade de calor perdida no sistema de refrigeração entre as temperaturas de entrada e saída do motor (85 e 97 ºC, respectivamente), resultando em 47,2 kW. Deste total, a quantidade que pode ser aproveitada depende da eficiência do trocador de calor usado (água-ar), que será considerada 80 %, correspondendo a 37,8 kW.

O calor dos gases de exaustão pode ser aproveitado pela colocação de um trocador de calor no escapamento do motor, gerando com isso uma certa quantidade de ar quente. A taxa de transferência de energia nos gases de exaustão é função da massa de gases, de seu calor específico e da diferença de temperatura à que serão sujeitos. A massa total dos gases de exaustão é a soma das massas de ar e de combustível que estão sendo empregados no motor, sendo que para se determinar a massa de biogás utilizada, é necessário aplicar a massa específica normal do biogás (ρ_n), descrita por MITZLAFF (1988), citado por SANTOS (2001), como sendo função de sua concentração de metano e de dióxido de carbono, como mostra a Eq. 5.2, em kg/m^3.

$$\rho_n = \frac{0{,}72\,(\%\,CH_4) + 1{,}96\,(\%\,CO_2)}{100} \tag{5.2}$$

Com estas concentrações dos constituintes, a massa específica do biogás resulta em 1,19 kg/Nm^3, determinando a massa usada no motor como sendo 0,0048 kg/s.

A massa de ar necessária para a combustão desta quantidade de biogás pode ser calculada de acordo com a composição básica deste combustível (62 % CH_4 e 38 % CO_2) e com a análise de sua reação de combustão estequiométrica em ar, mostrada abaixo:

$$0{,}62\ CH_4 + 0{,}38\ CO_2 + x\ O_2 + 3{,}76x\ N_2 \rightarrow y\ CO_2 + z\ H_2O + 3{,}76x\ N_2$$

onde z, y e x são os valores dos números de moles de água, de dióxido de carbono e de ar, que respectivamente assumem os valores de 1,24, 1 e 1,24.

A relação ar/combustível (A/C) em base molar nesta situação pode ser calculada pela razão entre as somas de moles de ar e de combustível, resultando em 5,9, e uma A/C mássica de 6,1. Os motores de combustão (como o estudado por SILVEIRA, 1994) são geralmente operados com 20% de excesso de ar, gerando uma nova razão A/C = 7,3, e permitindo a determinação da massa de ar nesta situação de 0,035 kg/s, resultando num total de 0,04 kg/s de gases de exaustão. O calor específico a pressão constante dos gases de exaustão é função da temperatura T [K], sendo calculado em kJ/kg.K, a partir da Eq. 5.4, desenvolvida por KEATING (1993), citado por BRIZI (2002).

$$c_p(T) = 1{,}00454 - 3{,}33379.10^{-5}\ T + 3{,}53354.10^{-7}\ T^2 - 1{,}44806.10^{-10}\ T^3 \qquad (5.4)$$

Como durante a passagem pelo trocador de calor os gases perdem calor sensível e apresentam um decréscimo de temperatura, ocorre uma conseqüente variação em seu c_p durante esta queda de temperatura, fazendo com que o calor deva ser calculado pela Eq. 5.5.

$$q = m\int c_p(T)\ dT \qquad (5.5)$$

onde:

m massa dos gases [kg/s]

Considerando-se a temperatura de saída do motor como sendo 450 ºC e a temperatura de exaustão para a atmosfera igual a 230 ºC (de modo a se evitar problemas de condensação de ácidos e de corrosão), obtém-se 9,6 kW de calor nos gases de exaustão. A energia que pode ser afetivamente aproveitada é função da eficiência do trocador de calor empregado na situação (gases-ar), sendo considerada 70 %, resultando numa quantidade de calor transmitida ao ar de 6,7 kW.

Com os resultados obtidos, pode-se dizer que da energia suprida pelo combustível (90,4 kW), 23,2 % (21 kW) são realmente transformados em energia elétrica no gerador, 41,8 % (37,8 kW) são retirados deste na forma de calor da água de

refrigeração e 7,4 % (6,7 kW) na forma de calor dos gases de exaustão, totalizando 27,5 % de perdas (24,9 kW).

5.2.2 Cálculo de carga térmica

Como o ambiente a se condicionar deve permanecer resfriado, o calor vai tender naturalmente a entrar neste ambiente, pela diferença de temperatura. Portanto, é necessário mensurar os meios pelos quais o calor é gerado (pela presença dos animais e por equipamentos elétricos ou eletrônicos) ou inserido no local (quando o calor se infiltra no ambiente por meio de frestas de portas e janelas ou por insolação e transmissão pelas paredes). A soma de todos esses valores resulta no valor total da quantidade de calor que deve ser retirada do recinto pelo sistema de condicionamento.

5.2.2.1 Calor proveniente dos animais

O calor proveniente dos animais é resultado se sua atividade metabólica, sendo esta proporcional à temperatura ambiente. De acordo com NÃÃS (1989), a energia térmica liberada pelas aves é cerca de 30 % de sua energia metabolizável (EM), que pode ser calculada pela Eq. 5.6:

$$EM = 388.m^{0,75}.e^{0,027.(22-T)} \quad [kJ/dia] \qquad (5.6)$$

onde:

T temperatura ambiente [ºC]

m massa do animal vivo [kg]

Esta equação é válida para temperaturas entre 25 e 40 ºC e teste total de energia, 80% são na forma de calor latente.

Para o início dos cálculos devem ser fixadas as condições do ar interno e externo ao galpão, que são dois pontos fundamentais no estudo de sistemas de condicionamento de ar. Com relação ao ambiente interno, existem certas condições

ambientais ideais para o aumento na produtividade das aves, onde a temperatura varia com a velocidade do ar no interior do galpão, gerando certas opções de combinações destes valores, como 15,5 ºC – 0,28 m/s, 21,1 ºC – 0,51 m/s e 23,9 ºC – 0,76 m/s (PAYNE, 1961, citado por AMERICAN SOCITY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERING – ASHRAE, 1977). Se a velocidade aumentar até 2,5 m/s, alguns benefícios são obtidos com o aumento da temperatura para 35 ºC (DRURY, 1966 e DRURY *et al.*, 1966, citados por ASHRAE, 1977). A umidade do ambiente interno também é um fator importante para o conforto térmico. Se a umidade relativa (ϕ) estiver entre 65 e 70 %, são observadas melhoras na plumagem e na qualidade comercial das aves (ASHRAE, 1977). Com base nestes dados, adotou-se uma condição ambiente com temperatura de 25 ºC e umidade relativa de 65 %. HEITMAN *et al.* (1958), MANGOLD *et al.* (1967) e LONGHOUSE *et al.* (1968), citados por ASHRAE (1977), estudaram a redução no consumo de alimento e na geração de calor imposta pelo aumento da temperatura ambiental a que são sujeitas, mostrada na Fig. A.2, sendo que a temperatura de bulbo seco (TBS) do ar no interior do galpão de 25 ºC faz com que a produção de aves atinja 97 % de seu valor normal (valor este relacionado às condições de conforto). O ambiente externo foi considerado com temperatura de bulbo úmido (TBU) = 24,5 ºC, TBS = 31 ºC e ϕ = 58 %, conforme sugerido pela NB – 10 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1972), com as condições externas recomendadas para o verão, na cidade de São Paulo.

Com estas condições e com a massa média das aves de 2 kg, calcula-se a quantidade de calor liberado no galpão pelas aves como sendo 14,6 kW (dos quais 11,7 kW são na forma latente).

5.2.2.2 Calor proveniente da iluminação

A potência dissipada pelos componentes de iluminação é também um fator importante na determinação da carga térmica do ambiente. É possível que nem sempre todas as lâmpadas estejam ligadas, por exemplo, no momento de maior insolação. Entretanto, o dimensionamento deve ser feito para o caso mais crítico, ou seja, levando-se em conta que todos os fatores de geração ou infiltração de calor agem ao mesmo tempo.

Para que se possa calcular a quantidade de calor liberada pelas lâmpadas, é necessário saber a quantidade de lâmpadas presentes no galpão. Com base no trabalho de SANTOS (2001), que empregou uma lâmpada incandescente de 60 W para cada 30 m^2, considera-se a existência de 16 lâmpadas de 60 W. É adotado que a potência da lâmpada é dissipada na forma de energia térmica e luminosa, sendo que esta última não sai do galpão, transformando-se em energia térmica. Portanto as 16 lâmpadas totalizam 0,96 kW.

5.2.2.3 Calor proveniente da infiltração por aberturas

De acordo com STOECKER & JONES (1985), a infiltração é a entrada não controlada de ar externo no recinto condicionado, adicionando calor sensível e/ou latente, podendo este ser retirado por meios naturais ou mecânicos. A vazão de infiltração função da direção e velocidade do vento, da diferença entre as temperaturas interna e externa e da pressão interna do ambiente, sendo difícil sua determinação e controle. Os ambientes dotados de condicionamento podem limitar os efeitos da infiltração, mas sem um sistema operante, ela torna-se impossível de se evitar.

No caso a ser estudado, será considerado que o galpão mantém suas cortinas laterais fechadas e que não há infiltração de ar pela abertura do telhado (lanternim), por onde ocorre somente saída de ar; além de todas as frestas da estrutura (frestas geradas entre as cortinas e a parede, e as das portas) sejam consideradas como frestas de portas mal ajustadas, conforme classificação presente na NB – 10 (ABNT, 1972), mostrado na Tab. A.2. A aplicação desta norma possibilita a determinação da vazão de

ar externo que entra no galpão pelas frestas e aberturas entre os ambientes externo e interno, sendo adotada uma vazão de 13 m^3/h (0,0036 m^3/s) para cada metro das frestas consideradas. Com as dimensões do galpão, pode-se determinar o comprimento total das frestas geradas entre a cortina e a parede lateral como sendo o perímetro da cortina, e entre a porta e a parede como sendo o perímetro da porta considerada, totalizando 228 m de frestas e 0,82 m^3/s de ar externo que entra no ambiente, inserindo calor. O fluxo de calor associado ao processo de infiltração pode ser determinado pela Eq. 5.7.

$$q = \rho \, .V \, . \, c_p \, . \, \Delta T \qquad (5.7)$$

onde:

ρ: massa específica do ar

V: volume

c_p: calor específico do ar

ΔT: diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo

A pesar de tanto a massa específica quanto o calor específico variarem com a temperatura, a diferença de temperatura do processo é tão pequena (6 ºC) que a causa mudanças mínimas nestas variáveis, optando-se por considerar as propriedades constantes com valores obtidos na Tab. A.3, tirados a 300 K (ρ = 1,1614 kg/m^3, c_P = 1,007 kJ/kg.K), resultando em uma quantidade de calor inserido pela infiltração de 5,75 kW.

5.2.2.4 Calor proveniente da transmissão pelas paredes

Quando um ambiente externo ao recinto condicionado tem temperatura superior à interna, o calor tende a se introduzir, passando pelas paredes. Portanto é necessário quantificar essa quantidade de calor, que deverá ser também retirada do recinto.

Com relação ao galpão em estudo, composto por paredes leste-oeste fechadas e paredes norte-sul somente até os 40 cm de altura, é considerado que durante o dia, há a

incidência de luz solar ao mesmo tempo em uma das paredes maiores e em uma das menores. De acordo com NÃÃS (1989), os fluxos de calor que atuam sob uma parede opaca exposta à incidência de raios do Sol podem ser esquematizados, conforme a Fig. 5.4.

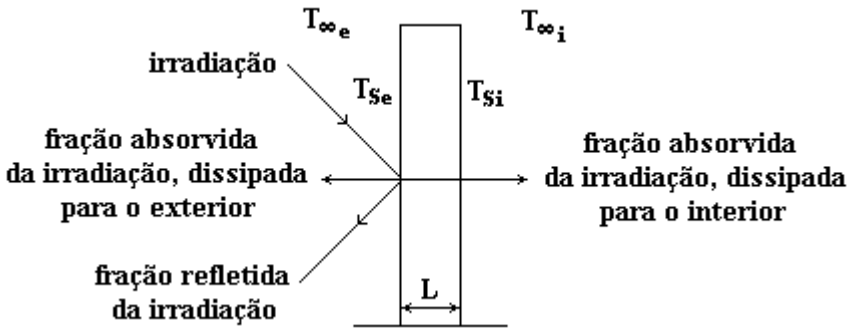


Figura 5.4: Esquema dos vetores energéticos na parede

Nesta situação, a quantidade de energia dissipada para o interior é dada pela Eq. 5.8.

$$q = U\left(T_{\infty e} + \frac{\alpha I}{h_e} - T_{\infty i} \right) \tag{5.8}$$

onde:

U coeficiente global de troca de calor

$T_{\infty e}$ Temperatura do ar externo

$T_{\infty i}$ Temperatura do ar interno

I Intensidade da radiação solar total

α absortividade da parte externa da parede

h_e coeficiente externo de troca de calor por convecção

5.2.2.4.1 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor (U) pode ser determinado pela resistência térmica encontrada entre a temperatura do ar externo e interno, passando pela parede, composta por tijolos revestidos por cimento, como mostra a Fig. 5.5.

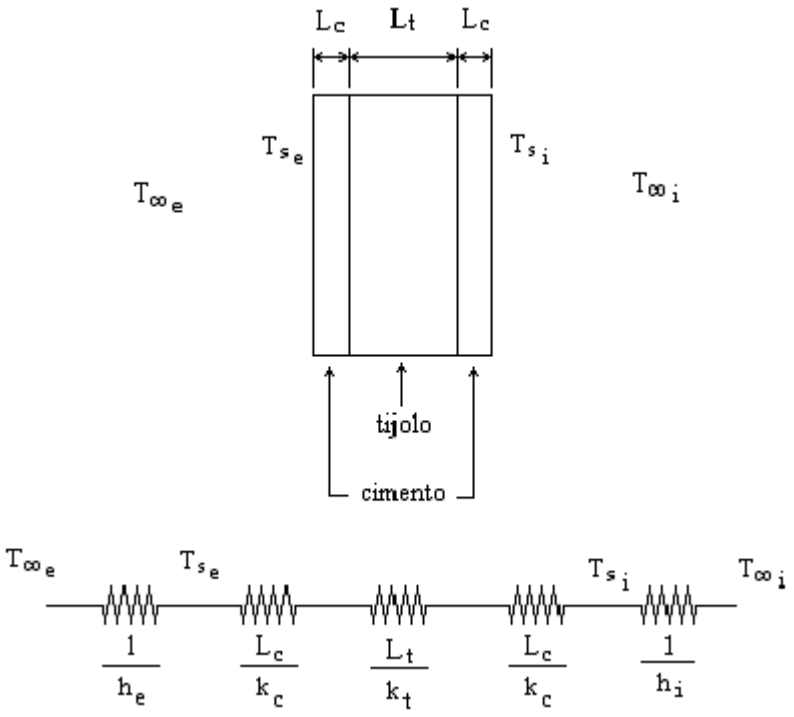


Figura 5.5: Esquema da parede com resistências térmicas.

O coeficiente global é o inverso da soma das resistências térmicas, mostrado pela Eq. 5.9.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{L_T}{k_T} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_i}} \tag{5.9}$$

onde:

$L_{C,T}$ espessura da camada de cimento e tijolo

$k_{C,T}$ constante de transmissividade térmica do cimento e do tijolo

Este valor deve ser calculado com os valores das constantes k dos materiais envolvidos (tabelados) e suas respectivas espessuras, e os coeficientes de transferência de calor por convecção (h). Segundo o procedimento descrito por INCROPERA & DeWITT (1998), os coeficientes h podem ser determinados com a adoção inicial das temperaturas envolvidas:

$T_{\infty e} = 31$ ºC $\qquad T_{Se} = 35$ ºC $\qquad T_{Si} = 30$ ºC $\qquad T_{\infty i} = 25$ ºC

Como as temperaturas da parede são maiores do que as do ambiente à sua volta, o ar que está em contato com a parede vertical começa a se aquecer e a subir, formando uma camada limite onde o escoamento pode apresentar certas instabilidades nas camadas fluidas e ocasionar mudanças no coeficiente de transferência de calor por convecção. A determinação de tal coeficiente se inicia com o cálculo do número de Rayleigh, que relaciona as forças de empuxo relativas à convecção natural e as forças viscosas relativas ao regime de escoamento, e pode ser expresso para o lado interno de acordo com a Eq. 5.10.

$$Ra_L = \frac{g \,.\, \beta \,(T_{Si} - T_{\infty i}).L^3}{\alpha \nu} \tag{5.10}$$

onde:

g aceleração gravitacional

β coeficiente volumétrico de expansão térmica do ar

T_{Si} temperatura superficial interna

L comprimento característico

α difusividade térmica do ar

ν viscosidade cinemática do ar

O comprimento característico L é a dimensão à qual o número de Rayleigh é aplicado, neste caso representado pela altura da parede, por ser esta a direção em que ocorre o escoamento e a transferência de calor.

Fazendo-se uma média das temperaturas envolvidas no processo, verifica-se que se as propriedades forem retiradas da Tab. A.3 a 300 K ($\alpha = 22{,}5.10^{-6}$ m^2/s, $\beta = 0{,}0033$ K^{-1}, $\nu = 15{,}89.10^{-6}$ m^2/s, $k = 26{,}3.10^{-3}$ W/m.K), não haverá inclusão de um erro considerável, portanto, com uma parede de 3,5 m de altura, tem-se $Ra_L = 1{,}94.10^{10}$, caracterizando um escoamento turbulento. Neste caso, o número de Rayleigh pode ser relacionado ao número de Nusselt (valor adimensional que indica o gradiente de temperatura numa superfície) pela expressão desenvolvida por CHURCHILL & CHU (1975), citado por INCROPERA & DeWITT (1998), mostrada na Eq. 5.11.

$$Nu = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(0{,}492/Pr\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \qquad (5.11)$$

onde:

Pr Número de Prandtl

O número de Prandtl é a relação entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica, e encontra-se tabelado em função da temperatura. Da Tabela A.3, com a temperatura de 300 K tem-se Pr = 0,707 e um número de Nusselt de 311,04, permitindo encontrar o valor de h_i com a Eq. 5.12.

$$Nu_L = \frac{h_i L}{k} \qquad (5.12)$$

onde:

L comprimento característico

Devido ao fato de o ar estar escoando naturalmente para cima durante a troca térmica, ele percorre uma distância igual à altura da parede, sendo esta variável usada como comprimento característico na Eq. 5.7, resultando em $h_i = 2{,}34$ W/m^2.K, sendo que o mesmo procedimento pôde ser aplicado para encontrar o h_e, resultando em 2,18 W/m^2.K.

Tendo os valores dos coeficientes h calculados, deve-se encontrar o coeficiente global com a Eq. 5.4, estimando as espessuras das camadas de cimento e de tijolo que constituem as paredes e utilizando os valores dos coeficientes k para esses materiais, sendo adotados os valores de L_C = 0,005 m, L_T = 0,015 m e k_C = 0,72 W/m.K, k_T = 0,72 W/m.K, mostrados respectivamente na Tab. A.4, resultando em U = 0,858 W/m^2.K. Repetiram-se os cálculos até obter a convergência dos resultados, sendo apresentados na Tab. 5.3.

Tabela 5.3: Resultados do cálculo dos coeficientes global e de transferência de calor por convecção interno e externo, em kJ/kg.K.

$T_{\infty e}$ [ºC]	T_{se} [ºC]	T_{si} [ºC]	$T_{\infty i}$ [ºC]	h_i	h_e	U
31	34,5	27,8	25	1,94	2,1	0,79

5.2.2.4.2 Determinação da absortividade da parede

Para se calcular a quantidade de calor inserida, deve-se encontrar a absortividade da superfície externa da parede. Este valor deve ser o menor possível, fazendo com que a parede armazene e dissipe pouco calor para suas vizinhanças.

Considerando-se o sol como um corpo negro a 5800 K e, sabendo que o poder emissivo de um corpo negro tem um valor máximo dependente da temperatura, com poder emissivo máximo, pode-se encontrar o comprimento de onda correspondente ao poder emissivo máximo a 5800 K, com base na Fig. A.3 (INCROPERA & DeWITT, 1998). A absortividade depende das características da superfície e do material da parede e do comprimento de onda da radiação considerada, sendo relacionadas na Fig. A.4. Se a parede externa for pintada com uma tinta branca, pode-se encontrar o valor da absortividade desta superfície para o comprimento de onda encontrado, resultando num valor de 0,1.

5.2.2.4.3 Cálculo da radiação solar incidente

Segundo DUFFIE & BECKMAN (1980), algumas relações geométricas da radiação solar direta incidente em um plano qualquer, para uma determinada posição relativa à Terra, podem ser descritas em termos de vários ângulos mostrados na Fig. 5.6.

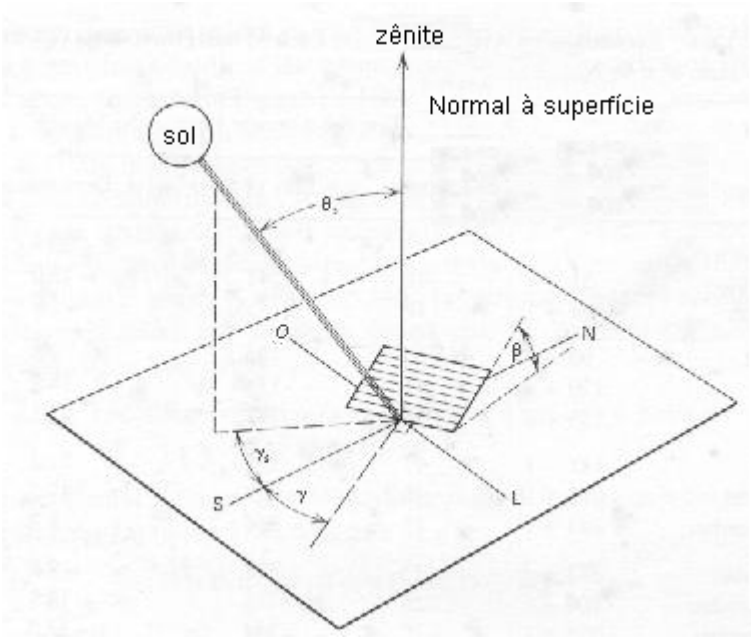


Figura 5.6: Ângulos da geometria solar (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

Portanto existem vários ângulos relacionados à localização geográfica, à geometria solar e ângulos relativos à inclinação da superfície que são importantes no estudo de radiação solar. Neste trabalho foram considerados mais importantes os seguintes:

ϕ - latitude: posição angular em relação à linha do equador. A convenção adotada é de Norte positivo e Sul negativo. Para Guaratinguetá, a latitude é de 22º48'43" Sul.

δ - ângulo de declinação do sol: ângulo do vértice no centro da Terra, formado pela semi-reta determinada pela direção do sol e o plano do equador. É calculado aproximadamente pela equação de Cooper, dada pela Eq. 5.13.

$$\delta = 23{,}45 \;\; \text{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \tag{5.13}$$

sendo n o número do dia do ano ($1 \leq n \leq 365$), com n = 15 (MONTANHINI, 1999).

ω - ângulo horário: pode-se considerar que em 24 horas o sol completa uma volta em torno da Terra, considerando assim 1 hora como um ângulo horário de 15º. O ângulo zero corresponde ao meio dia solar, sendo ω negativo antes do meio dia e positivo após.

β - ângulo de inclinação da superfície: ângulo que a superfície faz com o plano horizontal.

Com isso, pode-se correlacionar os valores da radiação direta que incide sobre uma superfície horizontal em radiação direta que incide sobre uma superfície inclinada, utilizando-se o fator de correção mostrado na Eq. 5.14.

$$R_b = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \tag{5.14}$$

com: $\cos \theta_1 = \cos (\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \text{sen} (\phi - \beta) \text{sen} \, \delta$

$\cos \theta_2 = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \, \phi \, \text{sen} \, \delta$

Portanto, o fator R_b pode transformar o valor da radiação solar que atinge um plano horizontal no valor que atingiria um plano de inclinação qualquer. Geralmente, estes valores da radiação solar total são dados diários, sendo necessário obter a radiação solar total horária. Segundo DUFFIE & BECKMAN (1980), os valores da radiação total diária são usados na determinação da radiação total horária, de acordo com a hora em questão e a duração do dia. Nos estudos estatísticos do tempo e de distribuição da radiação total diária sobre superfícies horizontais, é empregado o fator de distribuição (F), que relaciona a radiação total horária e a radiação total diária

oriunda das estações meteorológicas, obtido pelas curvas mostradas na Fig. 5.7, a partir da duração média do dia e da hora desejada.

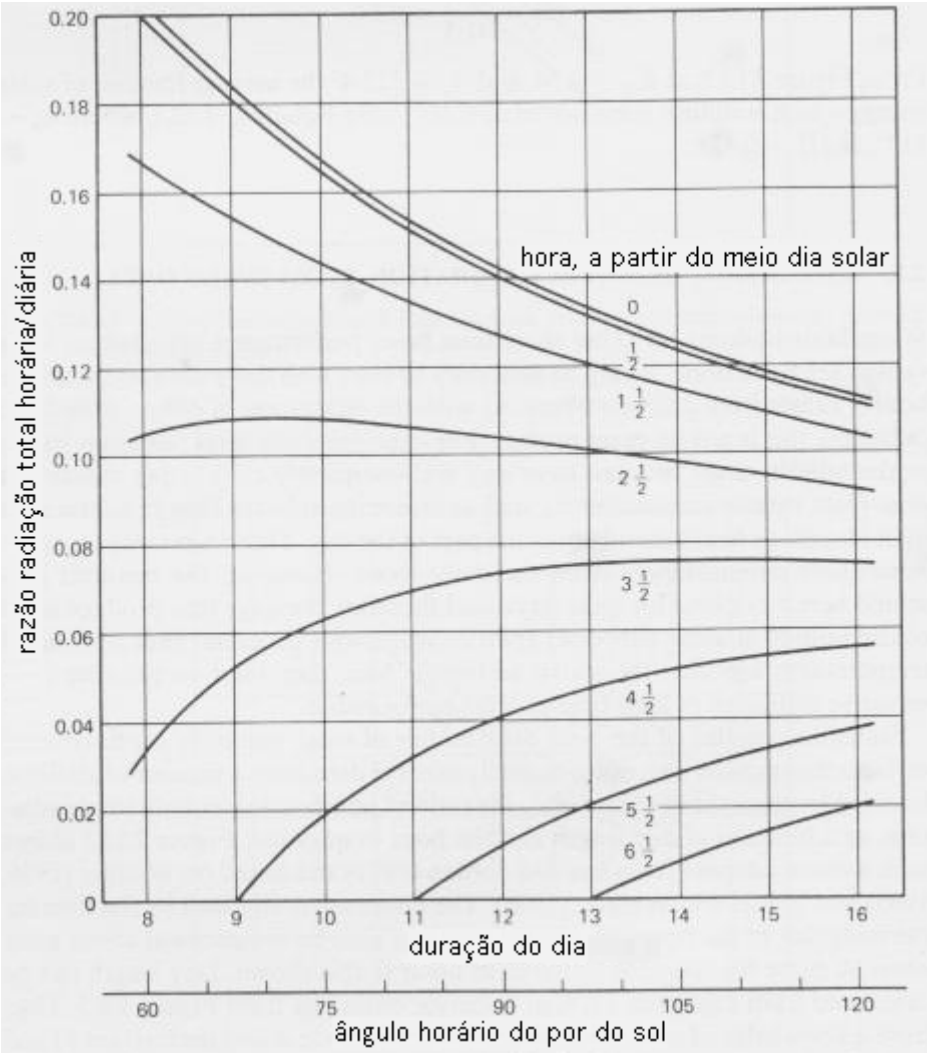


Figura 5.7: Fator de distribuição para a radiação solar total (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

A duração do dia (N) pode ser obtida relacionando a latitude e a declinação, dada em número de horas pela Eq. 5.15.

$$N = \frac{2}{15}\cos^{-1}\left(-\,\mathrm{tg}\phi\ \ \mathrm{tg}\delta\right) \qquad (5.15)$$

Este valor permite a determinação da razão entre a radiação total horária e a diária, mostrada na Fig. 5.6. Será considerado como dia típico de operação do sistema de condicionamento um dia de verão, entre as 9:30 às 19:30 horas, devido ao fato de serem dias longos e ao horário de verão. Com isso, torna-se necessário aplicar o procedimento para o horário crítico, onde é maior a insolação sobre a estrutura, que ocorre próximo ao meio-dia (considerado 13 horas, devido ao horário de verão). Com a solução da Eq. 5.10, obtém-se uma duração de 13,3 horas e com isso, um fator de distribuição de 0,132. Portanto, com o valor da radiação total diária de 16,5 MJ/m^2.dia (JANNUZZI *et al.,* 2003), obtém-se uma radiação total horária de 2,18 MJ/m^2.h (606 W/m^2). Este valor se refere a um plano horizontal, devendo-se aplicar o fator de conversão R_b = 0,027 para obter o valor da radiação total num plano vertical (16,5 W/m^2). O valor obtido é correspondente à radiação total, composta por uma fração de radiação direta (luz visível) e outra difusa (infravermelho), podendo esta última ser determinada graficamente pela Fig. 5.8, que mostra a relação entre a radiação difusa diária e a radiação total diária, a partir da relação entre a radiação total diária e a radiação extraterrestre, conforme sugerido por ORGILL & HOLLANDS (1977), citado por DUFFIE & BECKMAN (1980).

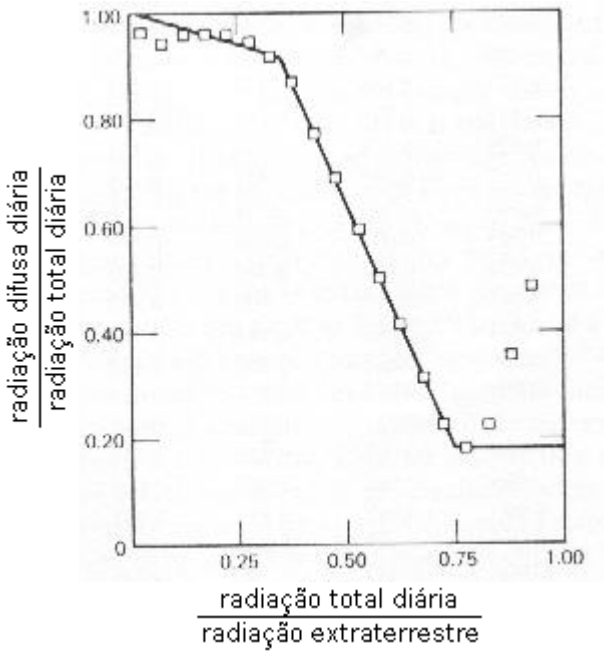


Fig. 5.8: Relação entre radiações diárias difusa e total em função da relação entre radiações total diária e extraterrestre (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

A radiação extraterrestre pode ser encontrada em função dos meses do ano como mostra a Fig. 5.9.

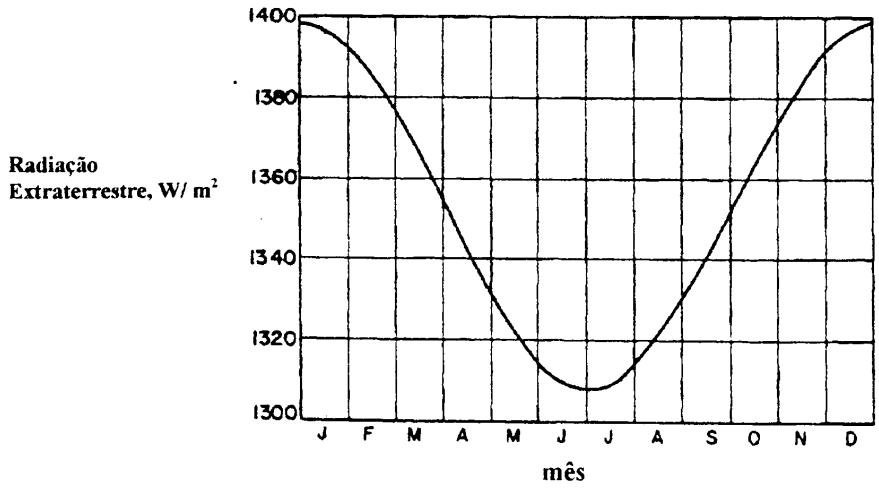


Figura 5.9: Variação da radiação solar extraterrestere com relação aos meses do ano (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

Considera-se que nos dias iniciais de janeiro (e nos finais de dezembro) a radiação extraterrestre assume o valor de 1,4 kW/m^2, resultando numa relação entre a radiação difusa diária e a radiação total diária de 0,78, resultando em 12,9 MJ/m^2.dia para a radiação difusa diária, que por sua vez deve fornecer a radiação difusa horária com o fator de distribuição de 0,12 (Fig. A.5), seguindo o mesmo procedimento realizado para a radiação total, obtendo-se 1,55 MJ/m^2.h (431 W/m^2) para uma superfície horizontal e 11,6 W/m^2 para uma vertical. Deve-se ressaltar que o valor a ser inserido na Eq. 5.3 é referente à radiação total e se refere às superfícies onde há incidência de luz solar, enquanto que a parcela difusa incide sobre todas as superfícies ao mesmo tempo. Portanto, a aplicação da Eq. 5.3 resulta em 5,34 W por m^2 de parede sob radiação total, além dos 5,15 W por m^2 das outras paredes (relativo à radiação difusa). Considera-se que a radiação total incide sobre uma das paredes leste-oeste e uma das paredes norte-sul, resultando em 334 W (total) e 322 W (difuso).

O mesmo procedimento pode ser aplicado para determinar a quantidade de calor que entra pelas cortinas e pelo telhado. Com relação às cortinas, foi considerado um material com um valor k = 0,13 W/m.K (borracha vulcanizada macia, INCROPERA &

DeWITT, 1996), com 1 mm de espessura, uma área de 155 m^2 (cada) e α = 0,1, resultando em 1,05 kW (total) e 1,02 kW (difuso).

O telhado constituído por telhas (com propriedades consideradas similares às do tijolo, com α = 0,8 e L = 0,07 m) foi considerado um plano horizontal, para permitir a relação entre os números de Nusselt e de Rayleigh conforme mostrado por INCROPERA & DeWITT (1996), determinando assim os coeficientes h interno (Eq. 5.16) e externo (Eq. 5.17).

$$Nu_L = 0{,}27\ Ra_L^{1/4} \tag{5.16}$$

$$Nu_L = 0{,}15\ Ra_L^{1/3} \tag{5.17}$$

O comprimento característico L é considerado a área do telhado dividido pelo seu perímetro. Calcula-se o número de Rayleigh e os resultados das Eq. 5.11 e 5.12 são usados na Eq. 5.7, encontrando 0,58 e 2,34 kW/m^2.K para os coeficientes h interno e externo respectivamente, e permitem a determinação do coeficiente global (U = 10,05 W/m^2.K) e do calor total (38,7 kW).

Foi desconsiderada a quantidade de calor que possa entrar no galpão pelo chão, pois este possui uma camada de cama que funciona como isolante térmico, podendo-se neste caso desconsiderar a intrusão de calor por esta fonte. Portanto, somando-se todas as fontes térmicas (metabolismo do animal, iluminação, infiltração e insolação), obtém-se um total de 60,1 kW por galpão (dos quais 11,7 kW são na forma latente).

5.2.3 Dimensionamento do sistema de condicionamento

Segundo a EMBRAPA (1998), o clima ideal do conforto térmico de aves criadas em regime confinado, não existe nas condições brasileiras, necessitando ser gerado num sistema de condicionamento. O calor, o frio e a variação diária de temperatura (amplitude térmica), são os fatores climáticos que mais afetam o comportamento, o desempenho e a resistência das aves às doenças. Se as condições internas no galpão forem adequadas, as aves respondem com melhor ganho de peso e consumo de ração,

baixa conversão alimentar e mortalidade reduzida. Além disso, o produtor diminui os gastos com energia (gás, lenha e eletricidade) para aquecer e/ou resfriar o ambiente. Portanto, deseja-se dimensionar um sistema de condicionamento para retirar a carga térmica calculada.

5.2.3.1 Sistema elétrico

Os sistemas de condicionamento térmico baseados em refrigeração por compressão (sistemas elétricos) são muito comuns, sendo utilizados inclusive em sistemas domésticos. Esse sistema se baseia na retirada do calor de um ambiente a partir de um compressor que, consumindo energia elétrica, comprime o fluido refrigerante. Com alta temperatura e pressão, o fluido perde calor no condensador e, já no estado líquido, perde pressão numa válvula de expansão. Esta válvula é um dispositivo de expansão que proporciona uma queda isentálpica de pressão (e de temperatura), levando o fluido para a região de saturação (líquido + vapor), com temperatura abaixo da ambiente. Ele é direcionado a um segundo trocador de calor chamado evaporador, onde o fluido refrigerante retira calor do ar externo para se transformar totalmente em vapor e então retornar ao compressor. A potência necessária no compressor deve ser calculada inicialmente com a identificação dos pontos das condições internas e externas na carta psicrométrica (Fig. A.6). É necessário que se determine um fator denominado Fator de Calor Sensível (FCS), que relaciona a quantidade de calor sensível (q_S) com relação à quantidade total (q_T), mostrado pela Eq. 5.18.

$$FCS = \frac{q_S}{q_T} \tag{5.18}$$

Com os valores calculados, o FCS resulta em 0,81, que permite a geração de uma reta entre este valor e o pólo da carta (TBS = 24 ºC, ϕ = 50 %) e será denominada reta FCS. Traça-se então uma reta partindo do ponto das condições internas até a curva de ϕ = 100 % (ponto de orvalho), paralela à reta FCS, e o ponto de insuflamento se

localiza no ponto de TBS dois graus acima do ponto de orvalho encontrado (TBS = 19 ºC e ϕ = 90 %). A reta entre o ponto de insuflamento e das condições internas indica a carga térmica a ser retirada (JENNINGS & LEWIS, 1944), apresentando uma diferença entálpica (Δh) de 7,5 kJ por kg de ar seco entre estes pontos. Com a carga térmica de 60,1 kW e um Δh = 7,5 kJ/kg_{AS}, encontra-se uma vazão de 8 kg_{AS}/s. Como a condição de insuflamento apresenta um conteúdo de umidade (também chamado de umidade absoluta, ω) de 0,012 kg/kg_{AS}, deve-se corrigir a vazão para 8,1 kg/s (nas condições de insuflamento). Para a obtenção das condições de insuflamento a partir das externas é empregado um sistema de refrigeração, e será considerada uma operação sem recirculação. A diferença entálpica entre estes pontos é de 30 kJ/kg_{AS}, sendo portanto necessária uma potência frigorífica de 243 kW, que pode ser obtida com uma máquina de 100 kW (considerando um sistema de refrigeração com coeficiente de performance próximo a 2,5), por galpão. Este valor não inclui a potência necessária nos ventiladores e na bomba de água gelada, mas por si só já é muito maior do que a potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração.

5.2.3.2 Sistema evaporativo

O sistema de resfriamento evaporativo se apresenta como uma alternativa a ser explorada no sentido de se realizar o condicionamento térmico consumindo pouca eletricidade. Ele se baseia na aspersão de água sob alta pressão por uma tubulação ramificada no teto do ambiente a ser condicionado, como mostra a Fig. 5.10.

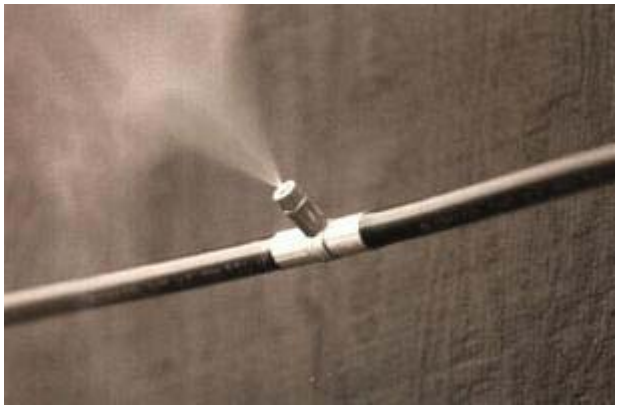


Figura 5.10: Bico aspersor (FLORENTINO, 2000).

Como a alta pressão na tubulação e o pequeno diâmetro na saída do líquido no aspersor, são formadas gotas muito numerosas e de dimensões muito pequenas, causando um grande aumento da área de contato com o ar. A água então absorve calor do ar para mudar de fase, ocasionando com isso um abaixamento na temperatura do ar, num processo adiabático. A Figura 5.11 mostra a utilização de ventiladores associados com aspersores, produzindo uma maior turbulência e uma maior eficiência de contato entre a água e o ar.

Figura 5.11: Utilização de aspersores em ventiladores (FLORENTINO, 2000).

A utilização de ventiladores seria o mais adequado ao galpão por manter uma certa velocidade do ar sobre os animais. Será considerado que os ventiladores sejam alocados em um tubo e que os aspersores se encontrem dentro deste, como mostra a Fig. 5.12.

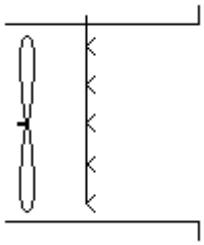


Figura 5.12: Esquema do método de insuflamento.

Este trajeto (1 m) impõe ao ventilador certa perda de carga, além daquela oriunda da descarga do ar no ambiente.

Para um bom funcionamento do sistema, o ar que recebe a água não pode ter umidade relativa alta, para que não haja condensação durante o processo. Portanto o procedimento de cálculos partirá de uma condição externa de TBS igual à sugerida na NB – 10 (ABNT, 1972), mas com umidade relativa de 40 % (e não de 58 % como sugerido), dando assim condições para a realização do estudo. A partir desta condição fixa (externa), realiza-se o procedimento para encontrar a temperatura final do processo (ambiente interno), visando atingir as condições internas de conforto.

Para se efetuar o cálculo da vazão de ar de insuflamento, parte-se do ponto das condições externas (na carta psicrométrica) numa linha de resfriamento isentálpico até encontrar a curva de saturação. Este ponto é relativamente próximo ao ponto das condições internas, fazendo com que o ponto de insuflamento seja adotado como sendo o ponto de TBS um grau acima do ponto de saturação (e não dois graus como sugerdido por JENNINGS & LEWIS, 1944, de modo a aumentar a diferença entálpica entre as condições de insuflamento e de conforto, diminuindo assim a vazão de insuflamento). A partir do ponto de insuflamento, traça-se uma reta paralela à reta FCS já calculada até encontrar um ponto próximo ao de conforto. Neste procedimento, foi encontrado o ponto de TBS = 26 ºC e ϕ = 73 %, sendo considerado satisfatório com relação ao ponto de conforto inicialmente escolhido (TBS = 25 ºC, ϕ = 65 %). A

variação de entalpia observada é de 5 kJ/kg_{AS}, resultando numa vazão de 12 kg_{AS}/s, o que corresponde a 12,2 kg/s nas condições de insuflamento (com ω = 0,015 kg/kg_{AS}). Consultando-se uma empresa especializada em condicionamento evaporativo de ambientes (Prime Tech), foi obtido o valor de 1,8 Hp (1,3 kW) necessários na bomba para realizar a aspersão no ambiente, por galpão.

Deve-se então determinar a potência de acionamento dos ventiladores, considerando inicialmente as velocidades recomendadas para o insuflamento no galpão. Tais velocidades são apresentadas na Tab. A.5, obtendo-se 400 m/min, conforme recomendada pela NB – 10 (ABNT, 1972) como velocidade preferível em dutos principais de ventilação, em escolas, teatros e edifícios públicos. Esta velocidade (6,7 m/s) pode indicar a dimensão da tubulação a partir da vazão necessária (10,5 m^3/s, com ρ = 1,1614 kg/m^3). Como a vazão é dividida por 4 ventiladores, o diâmetro dos tubos de insuflamento resulta em 71 mm, sendo considerado 1 m, causando um decréscimo na velocidade para aproximadamente 3,3 m/s. Com estes valores, pode-se iniciar os cálculos da potência do ventilador, mostrada na Eq. 5.19.

$$E_{vent} = \frac{Q.\Delta p}{\eta_{vent}} \tag{5.19}$$

onde:

Q vazão volumétrica

Δp perda de carga

η_{vent} rendimento do ventilador

A perda de carga imposta ao ventilador pode ser determinada com a caracterização do escoamento pelo número de Mach (M), que relaciona a velocidade do escoamento (v) com a velocidade de propagação do som no meio (c), representado pela Eq. 5.20.

$$M = \frac{v}{c} \tag{5.20}$$

Com os valores conhecidos, o número de Mach resulta aproximadamente em 0,01. De acordo com FOX & McDONALD (1995), se um escoamento compressível apresentar um número de Mach menor que 0,3, tal escoamento poderá ser modelado como incompressível. Neste caso, a perda de carga pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach (STREETER & WYLIE, 1982), mostrada na Eq. 5.21.

$$\Delta p = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2} \rho \tag{5.21}$$

onde:

f fator de atrito

L_e comprimento equivalente

D diâmetro da tubulação

v velocidade do escoamento

ρ massa específica do fluido

O fator de atrito é determinado pelo diagrama de Moody (Fig. A.7), a partir dos valores da rugosidade relativa do tubo e do número de Reynolds, que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas. A rugosidade relativa é a razão entre a rugosidade do material (e) e seu diâmetro (D), mostrada na Eq. 5.22.

$$E = \frac{e}{D} \tag{5.22}$$

Considerando-se que o duto seja feito de aço rebitado (Fig. A.8), tem-se uma rugosidade de 0,01 ft (0,003048 m), resultando numa rugosidade relativa de 0,003. O número de Reynolds pode ser calculado pela Eq. 5.23.

$$Re = \frac{\rho \, v \, D}{\mu} \tag{5.23}$$

onde:

ρ massa específica do fluido

v velocidade do escoamento

D diâmetro da tubulação

μ viscosidade dinâmica

Com as propriedades do ar (a 300 K) retirados da Tab. A.3, obtém-se ρ = 1,1614 kg/m^3 e μ = 184,6.10^{-7} N.s/m^2, e como resultado, Re = 2,1.10^5 e f = 0,026. O comprimento equivalente da tubulação seria a soma do comprimento real com a perda na saída do tubo, sendo obtida extrapolando-se os valores mostrados por AZEVEDO NETO & ALVAREZ (1973) na Tab. A.6, considerada 30 m. A perda de carga totaliza então 15 Pa e a potência do ventilador (considerando um equipamento com rendimento de 60 %) de 130 W. Portanto a soma da energia requerida na bomba (1,3 kW) e nos ventiladores (520 W) resulta em 1,82 kW por galpão, totalizando 7,3 kW.

Com a obtenção dos resultados, pode-se observar que a geração energética não foi suficiente para viabilizar tecnicamente a adoção de um sistema de fan-coils utilizando água gelada de um sistema de refrigeração elétrico, devido ao alto consumo energético deste tipo de equipamento. Entretanto, o sistema de resfriamento evaporativo mostrou-se aceitável devido à pouca quantidade de energia elétrica necessária ao seu funcionamento.

5.3 COMENTÁRIOS

Com base nos cálculos realizados, foram determinados os valores mostrados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4: Resultados obtidos.

Número de aves	28000
Quantidade de biogás gerado pelas aves	250 Nm^3/dia
Potência disponível no biogás (E_{comb})	90,4 kW
Potência elétrica gerada (E_p)	21 kW
Potência térmica disponível na água de refrigeração ($E_{água}$)	47,2 kW
Potência térmica disponível nos gases de exaustão (E_{gases})	9,6 kW
Potência térmica do ar quente gerado com água ($E_{ar\text{-}água}$)	37,8 kW
Potência térmica do ar quente gerado com gases ($E_{ar\text{-}gases}$)	6,7 kW
Potência térmica recuperada (E_t)	44,5 kW
Eficiência de geração elétrica (η_{el})	23,2 %
Eficiência de geração térmica (η_t)	49,2 %
Eficiência de global (η_g)	72,4 %

Com a adoção do sistema de resfriamento evaporativo, houve uma grande diminuição na quantidade de energia elétrica necessária, sendo que a produção do combustível e sua transformação no sistema de cogeração mostraram-se tecnicamente satisfatórias, visto que a quantidade de energia que pode ser aproveitada (elétrica e térmica) totaliza 72,4 % da energia inserida inicialmente. As perdas (aproximadamente 28 %) são impostas principalmente pelas perdas térmicas, por atrito e vibração.

A geração elétrica pode suprir parte das necessidades da granja, visto que este tipo de estabelecimento possui um consumo energético médio de 60 kW (de acordo com valor médio obtido por DELBIN, 2003), e a geração térmica sendo direcionada à produção de ar quente para o pinteiro, fazendo com que toda a energia cogerada seja empregada no local.

CAPÍTULO 6
ANÁLISE ECONÔMICA

6.1 INTRODUÇÃO

De acordo com BALESTIERI (2002), após realizada a análise técnica deve-se transpor outros tipos de barreiras, de ordem econômica, institucional, ambiental, etc, sendo consideradas neste trabalho a realização de um método econômico, de modo a relacionar variáveis que englobam os custos envolvidos (custos dos equipamentos a serem utilizados, de operação e manutenção destes, do combustível a ser usado), o tempo de funcionamento da unidade e as taxas de juros, visando a obtenção do tempo de retorno do capital investido e da receita anual esperada.

6.2 CÁLCULOS

O sistema de cogeração estudado é baseado num motor de combustão interna, acoplado a um gerador elétrico e a dois trocadores de calor, visando a obtenção de eletricidade e ar quente, representado na Fig. 6.1.

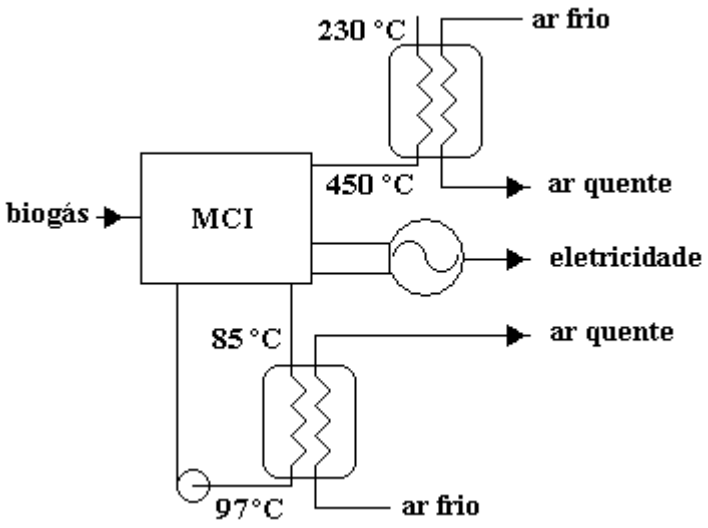


Figura 6.1: Esquema do sistema de cogeração usado.

De acordo com a Fig. 6.1, uma única fonte de energia (biogás) é responsável pela geração combinada de eletricidade e ar quente, caracterizando a cogeração ciclo topping (geração elétrica e aproveitamento do calor residual).

Os cálculos se baseiam na metodologia utilizada por SILVEIRA (1994), determinando inicialmente o custo da eletricidade gerada (C_{el}), que pode ser calculado pela Eq. 6.1.

$$C_{el} = \frac{I_{sc}}{H.E_p}\frac{q^k(q-1)}{q^k-1} + \frac{C_{comb}}{E_p}(E_{comb} - E_t - Per/2) + CM_{sc} \qquad (6.1)$$

onde:

I_{sg} investimento no sistema de cogeração [US$]

H tempo anual de operação [h]

E_p eletricidade produzida [kW]

E_{comb} potência suprida pelo combustível [kW]

E_t potência térmica aproveitada [kW]

Per perdas de energia [kW]

CM_{sc} custo de manutenção do sistema de cogeração [US$/kWh]

k período de amortização do capital [anos]

O custo do combustível (C_{comb}) pode ser determinado pela Eq. 6.2.

$$C_{comb} = \frac{I_{biod}}{H.E_{comb}}\frac{q^k(q-1)}{q^k-1} + \frac{C_{op}}{H.E_{comb}} + CM_{biod} \qquad (6.2)$$

onde:

I_{biod} investimento no biodigestor [US$]

C_{op} custo de operação do biodigestor [US$]

CM_{biod}custo de manutenção do biodigestor [US$/kWh]

A variável q pode ser definida pela Eq. 6.3.

$$q = 1 + \frac{r}{100} \tag{6.3}$$

onde:

r taxa anual de juros [%]

De acordo com o trabalho de SANTOS (2000), o investimento médio no biodigestor tipo batelada foi considerado com 27 US$/m^3 e seu custo de operação foi estimado como sendo custo o custo de um funcionário recebendo mensalmente US$ 150,00, com 13 salários anuais e mais 30 % de encargos sociais. Segundo (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996), o custo de manutenção dos biodigestores pode ser considerado como sendo 5% do seu investimento, dividido pela energia associada ao biogás produzido e pelo número de horas anuais de operação, assumindo o valor de 0,002 US$/kWh. Os biodigestores operam 7000 horas por ano, enquanto que o sistema de cogeração opera 2100 horas neste período (relativas a 3 meses de verão, mais dois meses antes e dois depois dele, totalizando 7 meses). O custo do investimento no sistema de geração foi considerado com sendo US$ 7000,00 (~ R$ 21000,00), equivalente ao custo de um equipamento de 30 kW da empresa Trigas, fabricante de unidades geradoras e economizadoras de energia, utilizando motores a biogás. O custo de manutenção do sistema de cogeração foi baseado no trabalho de SILVEIRA (1994), sendo considerado 0,008 US$/kWh e o preço da eletricidade comprada da rede foi considerado 0,07 US$/kWh, de acordo com SILVEIRA *et al.* (1997).

O ganho na produção de eletricidade (GP_{el}) é definido como a diferença entre os preços da eletricidade gerada (calculada) e comprada da rede (P_{el}), multiplicada pela eletricidade produzida e pelo número de horas de operação, como mostra a Eq. 6.4.

$$GP_{el} = E_p \,.\, H\,(P_{el} - C_{el}) \tag{6.4}$$

O custo da produção de ar quente (C_{aq}) também pode ser descrito em função do investimento nos trocadores de calor, como mostra a Eq. 6.5.

$$C_{aq} = \frac{I_{tc}}{H.E_{aq}} \frac{q^k (q-1)}{q^k - 1} + \frac{C_{comb}}{E_{aq}} \left(E_t + Per/2\right) + CM_{tc} \qquad (6.5)$$

onde:

I_{tc} investimento nos trocadores de calor [US$]

E_{aq} potência da água quente [kW]

CM_{tc} custo de manutenção dos trocadores de calor [US$/kWh]

O investimento nos trocadores de calor foi considerado como sendo 60 US$ por cada kWh de energia do ar quente gerado e seu custo de manutenção foi considerado como sendo a metade do custo de manutenção do motor, assumindo o valor de 0,004 US$/kWh. O ganho devido à produção de ar quente (GP_{aq}) é então a diferença entre os valores do custo da produção de ar quente calculado e o custo de ar quente produzido de maneira convencional utilizando bomba de calor ($C_{aq\text{-}conv}$), estimado como sendo 0,04 US$/kWh, o mesmo valor da produção de água quente mostrada por SILVEIRA *et al.* (1997), multiplicada pela energia do ar quente e pelo número de horas de operação, conforme mostra a Eq. 6.6.

$$GP_{aq} = E_{aq} \,.\, H \,.\, (C_{aq\text{-}conv} - C_{aq}) \qquad (6.6)$$

A receita anual esperada (R) pode então ser calculada pela Eq. 6.7.

$$R = GP_{el} + GP_{aq} \qquad (6.7)$$

Para a realização dos cálculos, algumas considerações foram feitas. Os cálculos de cada variável foram realizados variando-se a taxa anual de juros r (que foi assumido como 4, 12 e 20 %), e o pay-back foi analisado num período entre 1 e 5 anos. Com isso, foram calculadas as Eq. 6.1 a 6.7 e os valores reunidos nas Tab. 6.1, 6.2 e 6.3.

Tabela 6.1: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização, para taxa anual de juros de 4 %.

k [anos]	C_{comb} [US$/kWh]	C_{el} [US$/kWh]	GP_{el} [US$]	C_{aq} [US$/kWh]	GP_{aq} [US$]	R [US$]
0,020749	0,079398	-1381,48	0,093426	-16642,1	-18023,6	0,020749
0,012918	0,048127	3215,402	0,053161	-4099,71	-884,312	0,012918
0,010309	0,037708	4746,912	0,039747	78,94625	4825,858	0,010309
0,009006	0,032503	5512,078	0,033044	2166,67	7678,748	0,009006
0,008224	0,029383	5970,707	0,029027	3418,021	9388,729	0,008224

Tabela 6.2: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização, para taxa anual de juros de 12 %.

k [anos]	C_{comb} [US$/kWh]	C_{el} [US$/kWh]	GP_{el} [US$]	C_{aq} [US$/kWh]	GP_{aq} [US$]	R [US$]
1	0,021978	0,084305	-2102,84	0,099744	-18610,3	-20713,2
2	0,013863	0,051899	2660,84	0,058019	-5612,81	-2951,97
3	0,011169	0,041143	4241,957	0,04417	-1298,8	2943,157
4	0,009831	0,0358	5027,466	0,037289	844,4284	5871,895
5	0,009035	0,032621	5494,768	0,033196	2119,441	7614,21

Tabela 6.3: Valores dos custos, ganhos e receita em função do período de amortização, para taxa anual de juros de 20 %.

k [anos]	C_{comb} [US$/kWh]	C_{el} [US$/kWh]	GP_{el} [US$]	C_{aq} [US$/kWh]	GP_{aq} [US$]	R [US$]
1	0,023206	0,089212	-2824,2	0,106063	-20578,5	-23402,7
2	0,014828	0,055754	2094,147	0,062982	-7159,01	-5064,86
3	0,012066	0,044724	3715,58	0,04878	-2735	980,5823
4	0,010708	0,039299	4513,006	0,041795	-559,255	3953,751
5	0,00991	0,036115	4981,072	0,037696	717,8424	5698,914

Com os valores tabelados, foram elaborados gráficos relacionando o pay-back aos custos do combustível (Fig. 6.2), da produção de eletricidade (Fig. 6.3), do ar quente produzido (Fig. 6.4), assim como à receita anual esperada, como mostra a Fig. 6.5.

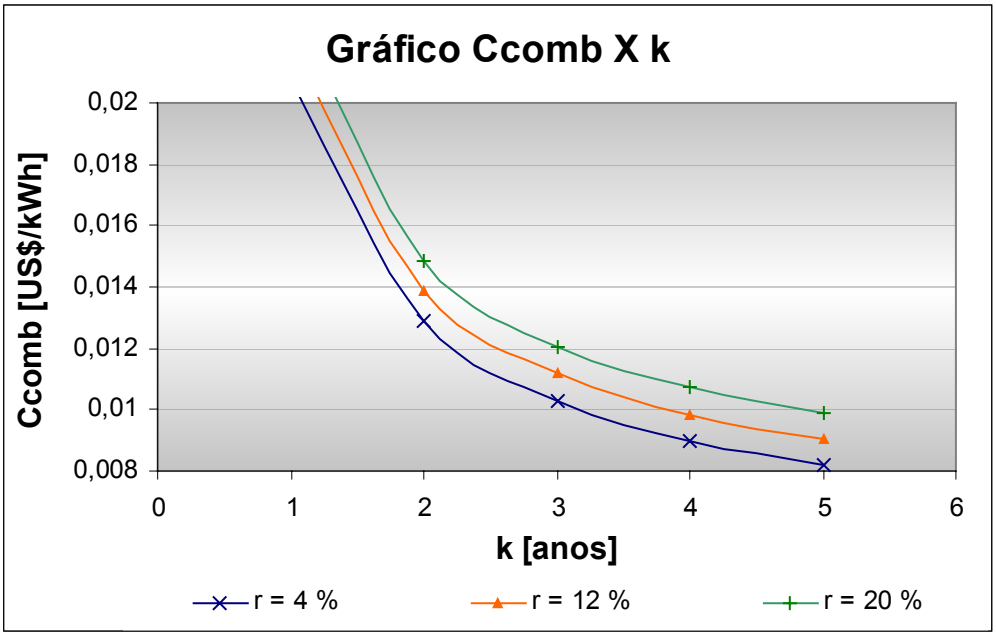


Figura 6.2: Variação do custo do combustível (C_{comb}) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k).

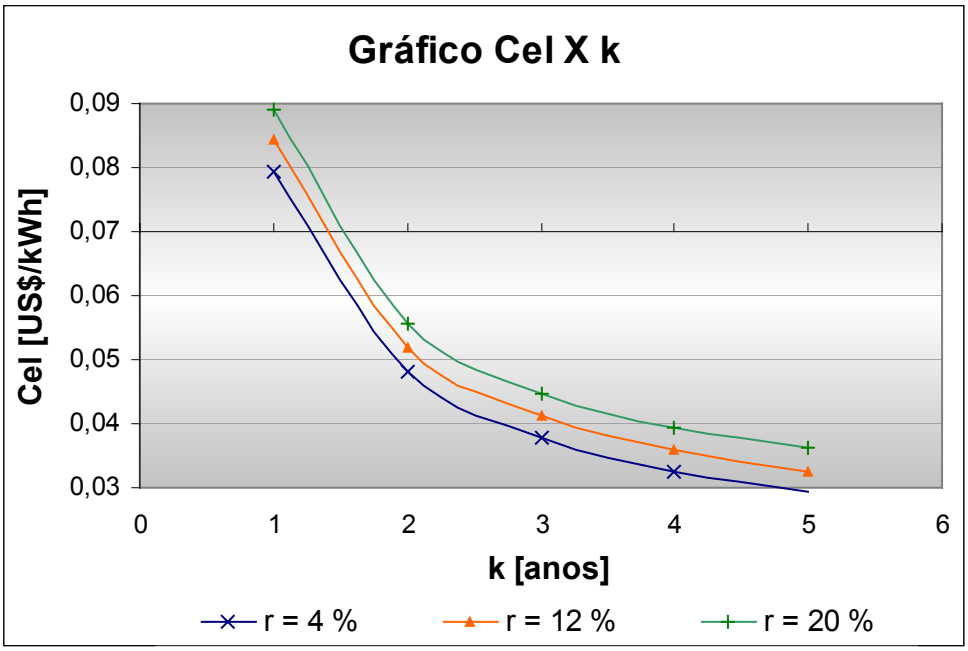


Figura 6.3: Variação do custo da eletricidade gerada (C_{el}) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k).

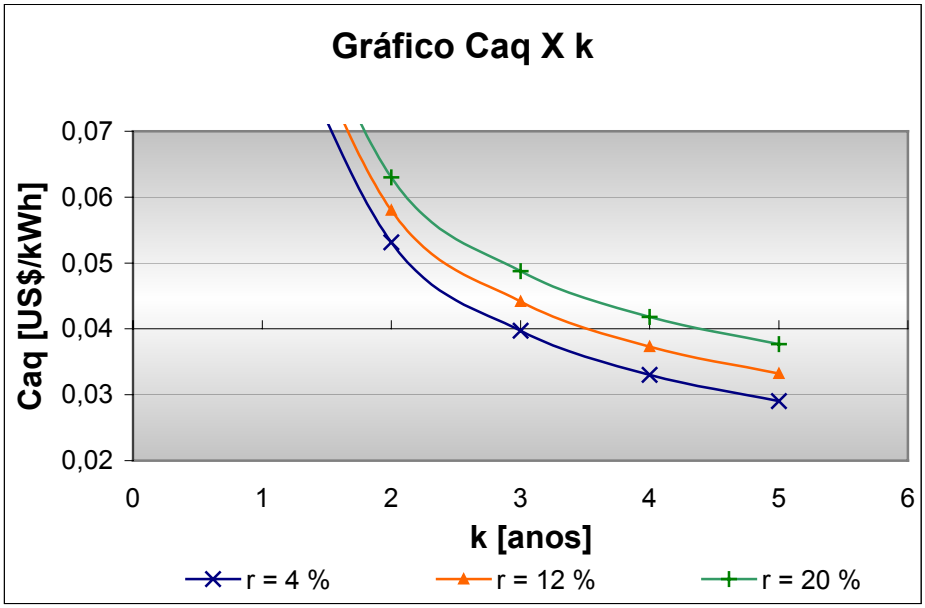


Figura 6.4: Variação do custo do ar quente produzido (C_{aq}) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k).

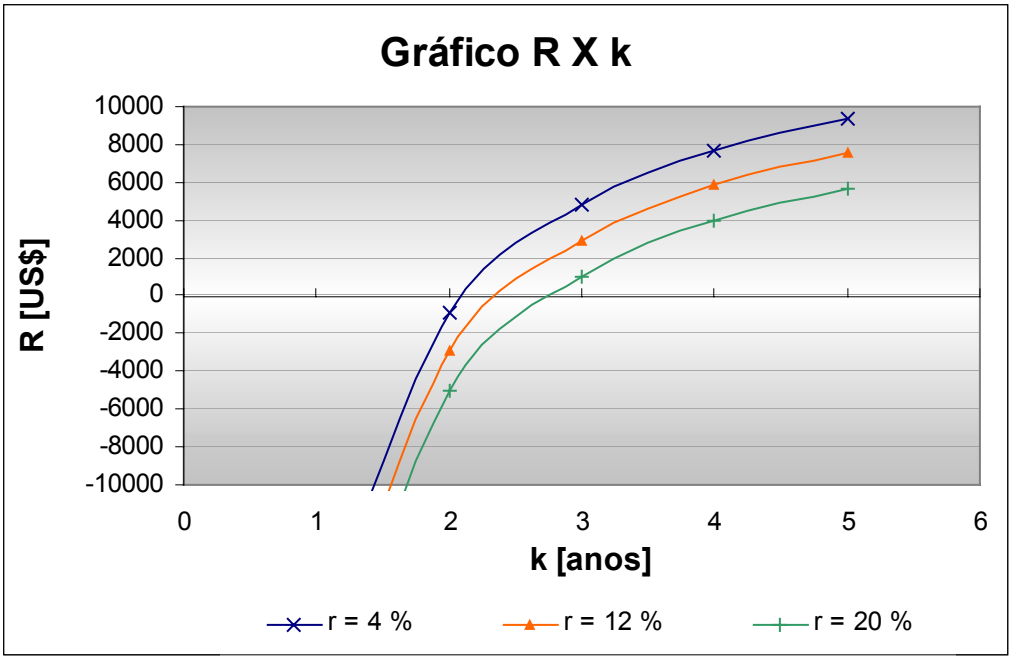


Figura 6.5: Variação da receita esperada (R) com a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k).

6.3 COMENTÁRIOS

Com a realização dos cálculos econômicos, foi possível observar que a eletricidade gerada apresenta um custo menor que a eletricidade comprada da rede, desde o início da implantação do sistema de cogeração, embasado por um baixo custo do combustível usado.

A análise da Fig. 6.5 mostra o pay-back para cada taxa de juros, permanecendo em média por volta dos dois anos e cinco meses. Neste ponto (receita zero), ocorre o retorno do investimento realizado, e os custos do biogás produzido, da eletricidade gerada e do ar quente produzido, correspondem a 0,013 US$/kWh, 0,047 US$/kWh e 0,051 US$/kWh, respectivamente.

CAPÍTULO 7
CONCLUSÕES

Depois de analisada a revisão técnica apresentada nos capítulos 2, 3 e 4, e de acordo com os cálculos realizados nos capítulos 5 e 6, pode-se chegar a algumas conclusões com respeito ao processo de utilização da biomassa como fonte energética para um sistema de cogeração de energia.

O processo de aproveitamento da biomassa utilizado (biodigestão anaeróbia) mostrou-se altamente aplicável na operação com cama de frango, de acordo com as pesquisas realizadas. A disponibilidade da cama no local, o baixo custo de construção, operação e manutenção dos biodigestores foram importantes no baixo custo obtido do biogás gerado, chegando a aproximadamente 0,013 US$/kWh em dois anos e meio e abaixo dos 0,009 US$/kWh em cinco anos.

A utilização do biogás produzido no local para o acionamento de um motor de combustão interna mostrou-se também interessante devido ao grande percentual de energia aproveitada (por volta de 72%) nas formas elétrica e térmica, a partir de um equipamento de custo relativamente baixo quando comparado a outras tecnologias de cogeração (turbinas a vapor e a gás, células de combustível). O sucesso da cogeração foi também decorrente do baixo custo do combustível usado, não considerando o custo inicial da cama, causando uma diminuição no preço da eletricidade gerada e do ar quente produzido.

O emprego de um sistema de refrigeração convencional mostrou-se inaplicável na situação estudada devido à grande demanda de energia elétrica necessária para o acionamento deste tipo de equipamento. A pesar de não ter se mostrado factível com as disponibilidades energéticas disponíveis, o sistema de refrigeração elétrico é muito versátil por poder operar sobre quaisquer circunstâncias climáticas, podendo ser empregado como unidade de reserva, quando o sistema principal se encontrar inoperante.

O uso do resfriamento evaporativo para a obtenção das condições necessárias no galpão mostrou-se satisfatório, atingindo uma condição final muito próxima à

condição considerada ideal, caso se mantenham favoráveis as condições climáticas. Este fato, juntamente com o baixo consumo de potência elétrica fizeram com que o sistema evaporativo fosse o indicado para esta situação. Se não for obtido o abaixamento desejado na temperatura, o sistema proporcionará uma amenização da sensação térmica devido ao efeito da ventilação.

O trabalho também mostrou a importância do estudo de fontes alternativas de energia, de modo a desenvolver e dominar estas tecnologias, consideradas indispensáveis para um futuro próximo. Todas as ações tomadas hoje no sentido da preservação dos recursos naturais poderão repercutir de maneira altamente positiva na melhoria da qualidade de vida das gerações futuras, em termos de utilização de resíduos e de diminuição de emissões. É também indispensável que se promovam ações de ordem social de modo a conscientizar a população da importância dos pequenos atos de preservação, como não jogar lixo nas ruas e rios, e economizar água e energia. Não pode existir ação em massa sem a participação de todos, coisa que só ocorre com educação da população. Seria, portanto, um movimento conjunto de caráter mundial, buscando a melhoria da qualidade e a sustentabilidade da vida no planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-MASRI, M. R., Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 77, p 97-100, 2001.

ALVARENGA, C. A., COSTA, D., LOBO, A. R., Renewable sources for decentralized energy supply, *World Renewable Energy Congress*, p 1152-1155, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING – ASHRAE, *ASHRAE Handbook*, New York, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *Instalações de Condicionamento de Ar*, P-NB – 10, 1972.

AZEVEDO NETO, J. M., ALVAREZ, G. A., *Manual de Hidráulica,* 6.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1973, 333p.

BARKER, S. N., Gasification and pyrolysis – routes to competitive electricity production from biomass in the UK, *Energy Conversion & Management*, 37, 6-8, p 861-866, 1996.

BARTH, T., Optimising reaction conditions relative to product slates in aqueous pressurised pyrolysis of biomass and wastes samples, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 53-62, 2003.

BAYKOV, B., STOYANOV, M., GUGOVA, M., Methane fermentation of dung from litter-free reared domestic animals – an optimisation study, *Resources, Conservation and Recycling,* 13, p 251-256, 1995.

BRAMER, E. A., BREM, G., A new tecnology for fast pyrolysis of biomass, development of a PyRos reactor, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 63-73, 2003.

BRAMMER, J. G., BRIDGWATER, A. V., Opportunities for bio-oil in european heat and power markets, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 75-80, 2003.

BRIDGWATER, A. V., Fast pyrolysis of biomass: technical requirements for commercialisation, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 33-40, 2003.

BRIDGWATER, A. V., GRONLI, M., Strategies for development and implementation of fast pyrolysis of biomass, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 675-679, 2003.

BRIZI, F., 2002, Energetic and Economic Analysis of a Brazilian Compact Cogeneration System: Comparison between Natural Gas and Biogas, UNESP – Guaratinguetá.

CANAVATE, J. O., Characteristics of different types of gaseous and liquids biofuels and their energy balance, *Journal of Agricultural Engineering Resources*, 59, p 231-238, 1994.

CARIDÀ, F., LCA di un Micropirolizzatore con TAG per l'utilizzo Energetico di RSU. Perugia, 2001. (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, Universidade de Perugia, Itália, para obtenção do título de Engenheiro Ambiental).

CHIARAMONTI, D., MARTELLI, F., TONDI, G., BONINI, M., BAGLIONI, P., Biomass pyrolysis for liquid co-firing in existing oil power plants: can Italy be a potential market?, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 91-103, 2003.

CHEN, G., ANDRIES, J., LUO, Z., SPLIETHOFF, H., Biomass pyrolysis/gasification for product gas production: the overall investigation of parametric effects, *Energy Conversion and Management*, 44, p 1875-1884, 2003.

COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, CAEEB, *O biogás e sua tecnologia*, Rio de Janeiro, Diretoria Técnica, Departamento de Fontes Alternativas de Energia, 1981.

DEL TORO, V., *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1999, 550p.

DELBIN, D., A sustentabilidade energética para criação de frango de corte: estudo de caso. Guaratinguetá, 2003. (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Guaratinguetá, para obtenção de título de Graduado em Engenharia Mecânica).

DEMIRBAS, A., Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquids and gaseous products, *Energy Conversion and Management*, 42, p 1229-1238, 2001.

Di BLASI, C., SIGNORELLI, G., Di RUSSO, C., REA, G., Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues, *Industrial Engeneering Chemical Resources*, 38, p 2216-2224, 1999.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 1980, 762p.

ECINAR, J. M., BELTRAN, F. J., BERNALTE, A., RAMIRO, A., GONZALEZ, J. F., Pyrolysis of two agricultural residues: olive and grape bagasse. Influence of particle size and temperature, *Biomass and Bioenergy*, 11, N°5, p 397-409, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, *O uso do PVC (viniagro) na melhoria do condicionamento ambiental de frangos de corte*, Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves, EMBRAPA, CT – 227, 1998, 4p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, *A arte de controle de estresse calórico em aves*, Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves, EMBRAPA, CT – 264, 2000, 2p.

FANTOZZI, F., Neural networks as a free model approach for waste and biomass pyrolysis products forecasting, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 125-132, 2003.

FANTOZZI, F., Di MARIA, F., DESIDERI, U., Integrated micro-turbine and rotary-kiln pyrolysis system as a waste to energy solution for a small town in central Italy – cost positioning and global warming assessment, *Proceedings of ASME*, paper GT 2002 - 30652, 2002.

FANTOZZI, F., D'ALESSANDRO, B., DESIDERI, U., IPRP – Integrated pyrolysis regenerated plant – an efficient and scalable concept for gas turbine based energy conversion from biomass and waste, *Proceedings of ASME*, paper GT 2003 - 38653, 2003.

FERNANDES FILHO, J. F., QUEIROZ, A. M., Transformações recentes na avicultura de corte brasileira: o caso do modelo de integração, 2001.

FLORENTINO, F. S., Análise comparativa de um sistema de condicionamento de ar evaporativo com um convencional. Guaratinguetá, 2000. 109p (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Guaratinguetá, para obtenção de título de Graduado em Engenharia Mecânica).

FOX, R. W., McDONALD, A. T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 4ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1995, 662p.

FREITAS, M. A. V., STEMMER, C. E., MOREIRA, J. R., CAMPOS, I. A., ZILLESS, R., FABRIZY, M. P., FEITOSA, E., CORRÊA, F., FAGÁ, M. T. W., FEDRIZZI, M. C., MAZZON, L. A., PEREIRA, O. S., O foro permanente das energias renováveis e o desenvolvimento das energias solar, eólica, da biomassa e das pequenas centrais hidroenergéticas no Brasil, *Revista Brasileira de Energia*, vol 6, Nº1, 1ºsem/1997.

GANESH, A., BANERJEE, R., Biomass pyrolysis for power generation – a potential technology, *Renewable Energy,* 22, p 9-41, 2001.

GIRARD, P., BLIN, J., Environment, health and safety PyNe working group: assessment of bio-oil toxicity for safe handling and transportation, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 155-160, 2003.

GOVERNO DE PERNAMBUCO, *Manual de instruções para o uso do biogás*, Coordenadoria de Energia, Secretaria dos Transportes, Energia e Comunicações, 1980.

GUST, S., NIEMINEN, J., NYRONEN, T., Forestera^{TM} – Liquefied wood fuel pilot plant, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 169-174, 2003a.

GUST, S., MCLELLAN, R. J., MEIER, D., OASMAA, A., PEACOCKE, G. V. C., Determination of basic fuel quality standards for biomass-derived pyrolysis liquids, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 161-168, 2003b.

HAMMAD, M., BADARNEH D., TAHBOUB, K., Evaluating variable organic waste to produce methane. *Energy Conversion & Management*, 40, p 1463-1475, 1999.

HENHAM, A., MAKKAR, M. K., Combustion of simulated biogas in a dual-fuel Diesel engine, *Energy Conversion and Management,* 39, Nº 16-18, p 2001-2009, 1998.

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, 4ª ed, Rio de Janeiro, John Wiley & Sons, 1998, 494p.

INYAN, S., SUGANTHI, L., JAGADEESAN, T. R., SAMUEL, A. A., Reliability based socio economic optimal renewable energy model for India. *Renewable Energy*, 19, p 291-297, 2000.

JANNUZZI, G. M., SILVA, E. P., UGAYA, C. L., JANNUZZI, P. M., QUEIROZ, G. R., *Recursos Energéticos e Consumo de Energia*, Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais – NEPAM, Campinas, 2003.

JENNINGS, B. H., LEWIS, S. R., *Air Conditioning and Refrigeration*, 2ª ed, Scranton, Textbook Company, 1944, 517p.

JURADO, F., CANO, A., CARPIO, J., Modelling of combined cycle power plants using biomass, *Renewable Energy,* 28, p 743-753, 2003.

KIELY, G., TAYFUR, G., DOLAN, C., TANJI, K., Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes, *Water Resources,* 3, p 534-540, 1997.

KYTÖ, M., MARTIN, P., GUST, S., Development of combustors for pyrolysis liquids, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 187-190, 2003.

LASTELLA, G., TESTA, C., CORNACCHIA, G., NOTORNICOLA, N., VOLTASIO, F., SHARMA, V. K., Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. *Energy Conversion & Management*, 43, p 63-75, 2002.

LÉDÉ, J., FERRER, M., BROUST, F., Fast pyrogasification and/or pyroliquefaction of Biomass in a cyclone reactor, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 191-201, 2003.

LEDERLIN, T., GAUTHIER, J. E. D., An evaporation model for bio-oil fuel, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 203-214, 2003.

LI, A. M., LI, X. D., LI, S. Q., REN, Y., CHI, Y., YAN, J. H., CEN, K. F., Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 50, p 149-162, 1999.

MACINTYRE, A. J., *Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais*, 3ª ed, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1996, 739p.

MARIOTTI, L., *Progettazione e Realizzazione del Sistema di Controllo, Regolazione e Monitoraggio per un Micropirolizzatore di Biomassa e Rifiuti da Laboratorio*. Perugia, 2002. (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, Universidade de Perugia, Itália, para obtenção do título de Engenheiro Mecânico).

MATHIEU, P., DUBUISSON, R., Performance analysis of a biomass gasifier, *Energy Conversion & Management*, 43, p 1291-1299, 2002.

MEIER, D., JESUSSEK, G., RADTKE, S., Chemical stability of wood fast pyrolysis liquids, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 221-228, 2003.

MIRANDA, M., COSTA, P., PINTO, F., GULYURTLU, I., CABRITA, I., Pyrolysis of Plastics and Tyre Wastes, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 229-236, 2003.

MLAOUHI, A., THAYER, B. B., KESRAOUI, R., DEPEYRE, D., Technical evaluation of rural biogas installations in Tunisia, *World Renewable Energy Congress*, p 980-983, 1996.

MONTAHINI, D. S. O. *Racionalização do uso de energia em edificações*. Guaratinguetá, 1999. 67p. (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Guaratinguetá, para obtenção de título de Graduado em Engenharia Mecânica).

MOSCA, D., *Simulazzione con Tecniche di Intelligenza Artifiziale della Pirolisi di Biomasse*. Perugia, 2002. (Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia, Universidade de Perugia, Itália, para obtenção do título de Engenheiro de Materiais).

NÃÃS, I.A.. *Princípios de Conforto Térmico na Produção Animal*, São Paulo, Ed. Ícone, 1989, 183p.

NI, J. Q., NYNS, E. J., New concept for the evaluation of rural biogas management in developing countries. *Energy Conversion & Management*, 37, 10, p 1525-1534, 1996.

OMER, A. M., FADALLA, Y., Biogas energy technology in Sudan, *Renewable Energy*, 28, p 499-507, 2003.

OTHMAN, M. Y. H., YATIM, B., SALLEA, M. M., Chicken dung biogas power generating system in Malaysia, *World Renewable Energy Congress*, p 930-933, 1996.

SANTOS, T. M. B., *Caracterização química, microbiológica e potencial de produção de biogás a partir de três tipos de cama, considerando dois ciclos de criação de frangos de corte*, Jaboticabal, 1997. 95p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia – Produção Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, T. M. B., *Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frango de corte*, Jaboticabal, 2001. 167p. Tese (Doutorado em Zootecnia – Produção Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

SAYIGH, A., Renewable energy – the way foward, *Applied Energy*, 64, 15-30, 1999.

SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14, Belém, *Avaliação econômica comparativa entre sistema solar fotovoltaico, conjunto motor-gerador e rede de distribuição rural para suprimento de pequenas localidades isoladas,* 1997, Belém.

SHIPKOVS, P., KASHKAROVA, G., SHIPKOVS, M., Renewable energy utilization in Lativia. *Renewable Energy*, 16, p 1241-1244, 1999.

SILVEIRA, J. L., *Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário*, Campinas, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas.

SILVEIRA, J. L., LEITE, N. G. C., RIBEIRO, J. F., Análise do potencial de produção de água quente com motores Diesel: a cogeração. *III Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica*, p 220-224, 1997.

SINGH, P. P., GHUMAN, B. S., GREWAL, N. S., Computer model for performance prediction and optimization of unheated biogas plant. *Energy Conversion & Management*, 37, 1/2, p 51-63, 1998.

SOLANTAUSTA, Y., OASMAA, A., SIPILA, K., Fast pyrolysis of forestry residues, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 271-276, 2003.

STREETER, V. L., WYLIE, E. B., *Mecânica dos Fluidos*, 7ª ed, São Paulo, McGraw Hill, 1982, 585p.

SUN, L., XU, M., SUN, R. F., Behaviour of Corn Stalk in an Indirectly Heated Pyrolysis Reactor, *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 277-282, 2003.

STOECKER, W. F., JONES, J. W., *Refrigeração e Ar Condicionado,* São Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1985, 481p.

TIWARI, G. N., USMANI, J. A., CHANDRA, A., Determination of period for biogas production. *Energy Conversion & Management*, 37, 2, p 199-203, 1996.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG, *Princípios de tratamento biológico de águas residuárias – Reatores Anaeróbios*, vol 5, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, 1997, 245p.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, *Handbook of biobas utilization*, Southeastern Regional Biomass Energy Program, 2ª ed., 1996, 204p.

VAN WYLEN, G., SONNTAG, R., BORGNAKKE, C. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 4.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997. 589p.

ZABANIOTOU, A. A., KARABELAS, A. J., The Evritania (Greece) Demonstration plant of biomass pyrolysis, *Biomass and Bioenergy*, 16, p 149-162, 1999.

ZABANIOTOU, A. A., KARABELAS, A. J., Pyrolysis as a method for utilization of solid wastes in Greece (agricultural wastes and used tyres), *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*, New Greenham Park - UK, ISBN 1 872691 77 3, p 299-305, 2003.

ZANZI, R., SJOSTROM, K., BJORNBOM, E., Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature, *Biomass and Bioenergy*, 23, p 357-366, 2002.

ANEXO

Tabela A.1: Propriedades de sólidos e líquidos (VAN WYLEN *et al.*, 1997).

Sólido	c_p, kJ/kg K	ρ, kg/m³	Líquido	c_p, kJ/kg K	ρ, kg/m³
Alumínio	0,9	2700	Amônia	4,8	602
Concreto	0,65	2300	Benzeno	1,72	879
Cobre	0,386	8900	Butano	2,469	556
Vidro	0,8	2300	Etanol	2,456	783
Granito	**1,017**	**2700**	**Glicerina**	**2,40**	**1200**
Grafite	0,711	2500	Iso-octano	2,1	692
Ferro	0,450	7840	Mercúrio	0,139	13560
Chumbo	0,128	11310	Metanol	2,55	787
Borracha (macia)	1,84	1100	Óleo (leve)	1,8	910
Areia (seca)	**0,8**	**1450-1750**	**Propano**	**2,54**	**510**
Prata	0,235	10470	R-12	0,971	1310
Aço (AISI302)	0,48	8050	R-134a	1,43	1206
Estanho	0,217	5730	Água	4,184	997
Madeira (maioria)	1,76	350-700			

Tabela A.2: Vazão de infiltração de ar por frestas (NB – 10, ABNT, 1972).

Tipo de abertura	*Observação*	*m³/h por metro de fresta*
Janelas		
— comum		3,0
— basculante		3,0
— guilhotina c/ caixilho de madeira	Mal ajustada	6,5
	Bem ajustada	2,0
— guilhotina c/ caixilho metálico	Sem vedação	4,5
	Com vedação	1,8
Portas	Mal ajustada	13,0
	Bem ajustada	6,5

Tabela A.3: Propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica (INCROPERA & DeWITT, 1998).

T (K)	ρ (kg/m³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m²)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
100	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
150	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,690
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1.000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726
1.100	0,3166	1,159	449,0	141,8	71,5	195	0,728
1.200	0,2902	1,175	473,0	162,9	76,3	224	0,728
1.300	0,2679	1,189	496,0	185,1	82	238	0,719
1.400	0,2488	1,207	530	213	91	303	0,703
1.500	0,2322	1,230	557	240	100	350	0,685
1.600	0,2177	1,248	584	268	106	390	0,688
1.700	0,2049	1,267	611	298	113	435	0,685
1.800	0,1935	1,286	637	329	120	482	0,683
1.900	0,1833	1,307	663	362	128	534	0,677
2.000	0,1741	1,337	689	396	137	589	0,672
2.100	0,1658	1,372	715	431	147	646	0,667
2.200	0,1582	1,417	740	468	160	714	0,655
2.300	0,1513	1,478	766	506	175	783	0,647
2.400	0,1448	1,558	792	547	196	869	0,630
2.500	0,1389	1,665	818	589	222	960	0,613
3.000	0,1135	2,726	955	841	486	1.570	0,536

Tabela A.4: Propriedades termofísicas de materiais comuns (INCROPERA & DeWITT, 1998).

Descrição/Composição	Densidade, ρ (kg/m³)	Condutividade Térmica, k (W/m · K)	Calor Específico, c_p (J/kg · K)
Placas de Revestimento ou Estruturais			
Placa de cimento-amianto	1.920	0,58	—
Placa de gesso ou reboco	800	0,17	—
Compensado de madeira	545	0,12	1.215
Revestimento isolante, densidade regular	290	0,055	1.300
Isolante acústico	290	0,058	1.340
Papelão	640	0,094	1.170
Papelão, alta densidade	1.010	0,15	1.380
Aglomerado de madeira, baixa densidade	590	0,078	1.300
Aglomerado de madeira, alta densidade	1.000	0,170	1.300
Madeiras			
Madeiras de lei (carvalho)	720	0,16	1.255
Madeiras moles (pinho)	510	0,12	1.380
Materiais de Alvenaria			
Argamassa de cimento	1.860	0,72	780
Tijolo, comum	1.920	0,72	835
Tijolo, de fachada	2.083	1,3	—
Tijolo cerâmico, oco			
1 célula de profundidade, 10 cm de espessura	—	0,52	—
3 células de profundidade, 30 cm de espessura	—	0,69	—
Bloco de concreto, 3 furos ovais			
Areia/brita, 20 cm de espessura	—	1,0	—
Agregado de cinzas, 20 cm de espessura	—	0,67	—
Bloco de concreto, furos retangulares			
2 núcleos, 20 cm de espessura, 16 kg	—	1,1	—
Idem, com os núcleos preenchidos	—	0,60	—
Materiais para Emboço			
Emboço de cimento e areia	1.860	0,72	—
Emboço de gesso e areia	1.680	0,22	1.085
Emboço de gesso e vermiculita	720	0,25	—

Tabela A.4: Propriedades termofísicas de materiais comuns (continuação) (INCROPERA & DeWITT, 1998).

Descrição/ Composição	Temperatura (K)	Densidade, ρ (kg/m³)	Condutividade Térmica, k (W/m · k)	Calor Específico, c_p (J/kg · K)
Asfalto	300	2.115	0,062	920
Bakelite	300	1.300	1,4	1.465
Tijolos refratários				
Carborundo	872	—	18,5	—
	1.672	—	11,0	—
Tijolo de cromita	473	3.010	2,3	835
	823		2,5	
	1.173		2,0	
Sílica diatomácea,	478	—	0,25	—
queimado	1.145	—	0,30	
Tijolo refratário,	773	2.050	1,0	960
queimado a 1.600 K	1.073	—	1,1	
	1.373	—	1,1	
Tijolo refratário,	773	2.325	1,3	960
queimado a 1.725 K	1.073		1,4	
	1.373		1,4	
Tijolo refratário, comum	478	2.645	1,0	960
	922		1,5	
	1.478		1,8	
Magnesita	478	—	3,8	1.130
	922	—	2,8	
	1.478		1,9	
Argila	300	1.460	1,3	880
Carvão, antracita	300	1.350	0,26	1.260
Concreto (com brita)	300	2.300	1,4	880
Algodão	300	80	0,06	1.300
Gêneros Alimentícios				
Banana (75,7% teor de água)	300	980	0,481	3.350
Maçã vermelha (75% teor de água)	300	840	0,513	3.600
Massa de bolo	300	720	0,223	—
Bolo, totalmente assado	300	280	0,121	—
Carne branca de frango	198	—	1,60	—
(74,4% teor de água)	233	—	1,49	
	253		1,35	
	263		1,20	
	273		0,476	
	283		0,480	
	293		0,489	
Vidro				
Chapa (vidro de soda)	300	2.500	1,4	750
Pyrex	300	2.225	1,4	835

Tabela A.5: Velocidades de escoamento em dutos de ar condicionado (NB – 10, ABNT, 1972).

DESIGNAÇÃO	*Preferíveis m/min*			*Máximas m/min*		
	Residências	*Escolas Teatros e Edifícios Públicos*	*Edifícios Industriais*	*Residências*	*Escolas Teatros e Edifícios Públicos*	*Edifícios Industriais*
Tomada de ar exterior (1)	210	250	300	250	270	370
Filtros	80	90	110	90	110	110
Serpentinas (1) (2)	140	150	180	150	180	210
Lavador de ar	150	150	150	150	150	150
Aspiração do ventilador	110	250	300	280	300	430
Descarga do ventilador	300 a 500	400 a 600	500 a 750	520	650	850
Dutos principais	200 a 280	300 a 400	350 a 550	300	430	600
Ramais horizontais	180	180 a 270	240 a 300	210	300	370
Ramais verticais	150	180 a 210	250	200	280	300

Tabela A.6: Comprimentos equivalentes a perdas localizadas (AZEVEDO NETO & ALVAREZ, 1973).

DIÂMETRO D mm	DIÂMETRO D pol	COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° $R/D \cdot 1\frac{1}{2}$	CURVA 90° $R/D \cdot 1$	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZ.	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

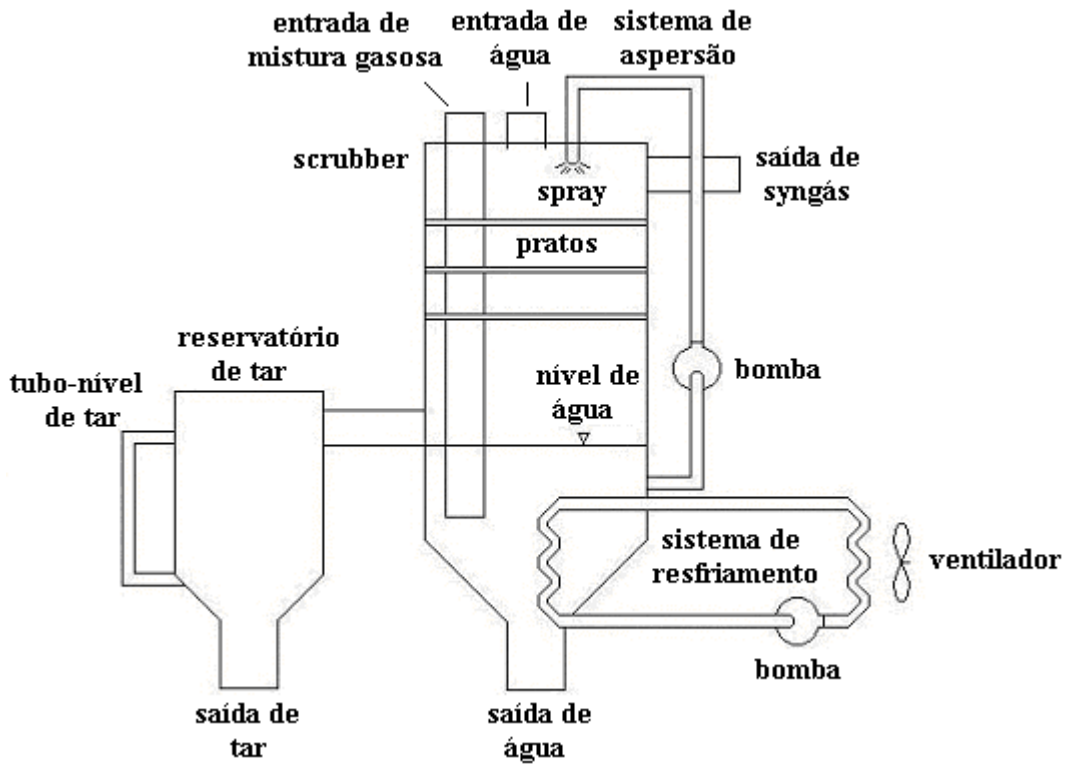


Figura A.1: Esquema do scrubber.

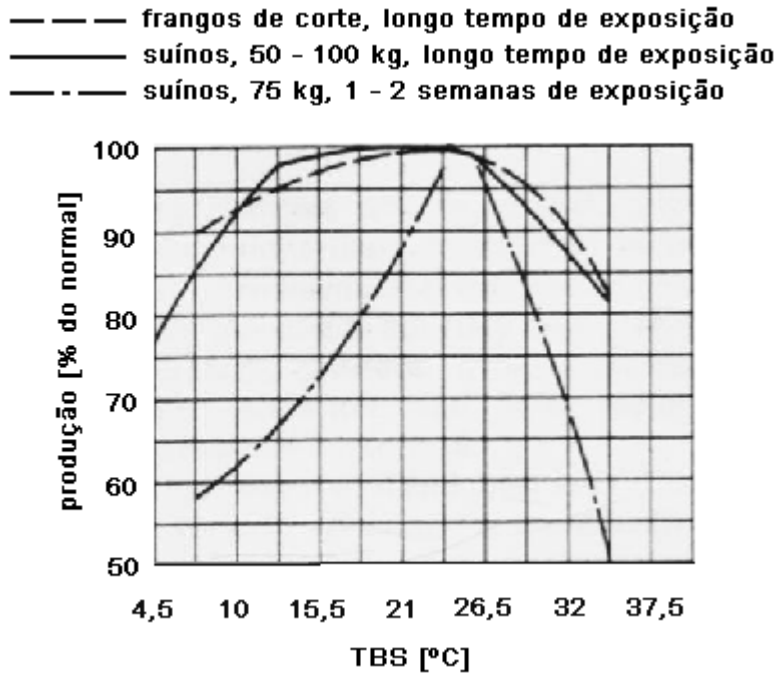


Figura A.2: Variação da produção animal com a temperatura (ASHRAE, 1977).

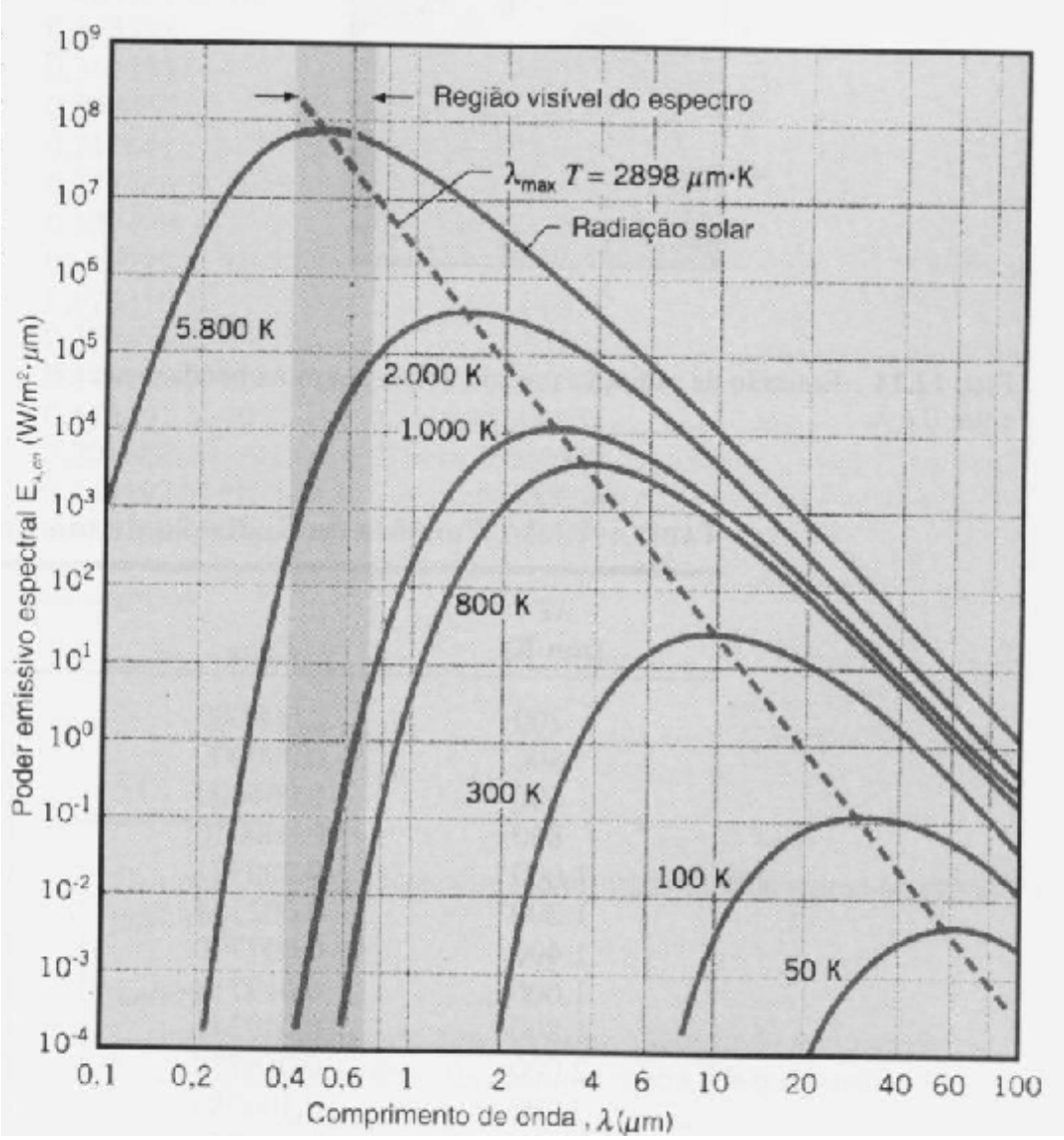


Figura A.3: Poder emissivo de um corpo negro (INCROPERA & DeWITT, 1998).

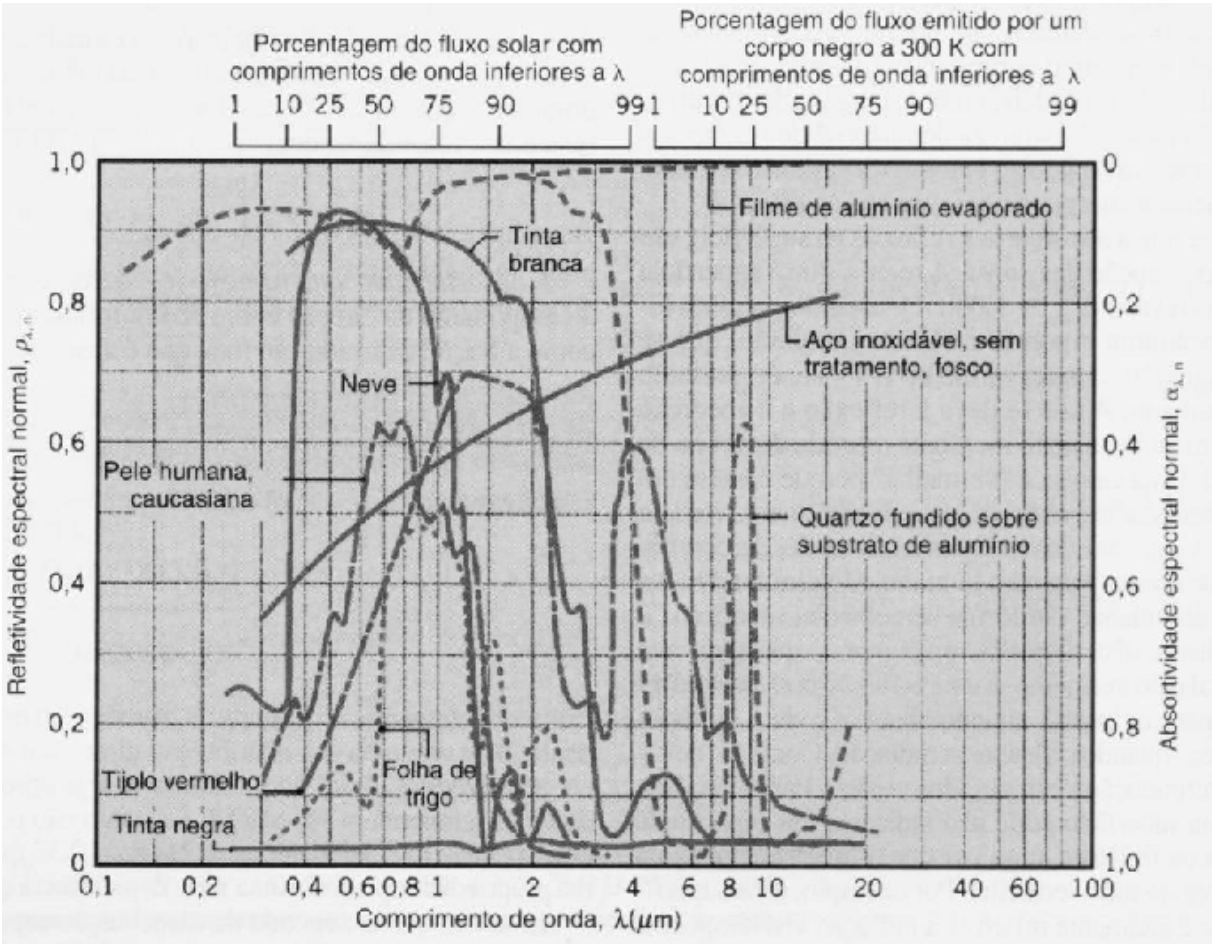


Figura A.4: Dependência da absortividade com o comprimento de onda (INCROPERA & DeWITT, 1998).

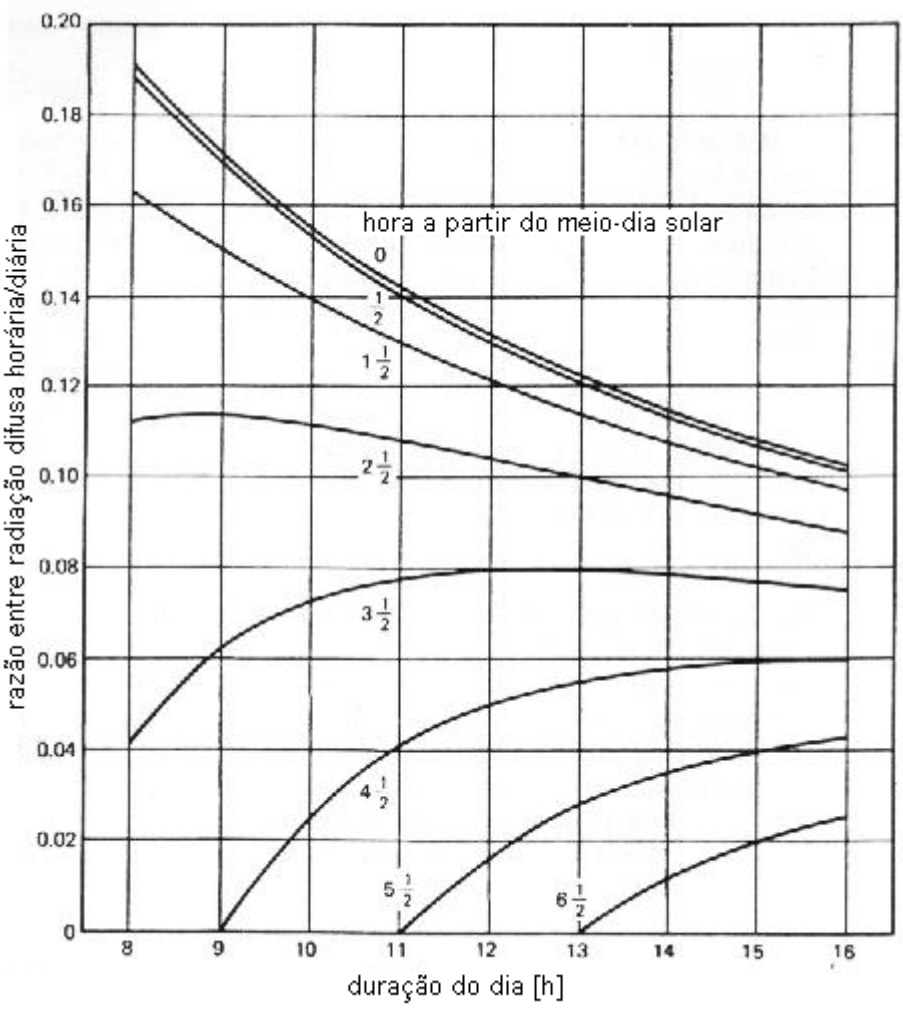


Figura A.5: Fator de distribuição para a radiação difusa (DUFFIE & BECKMAN, 1980).

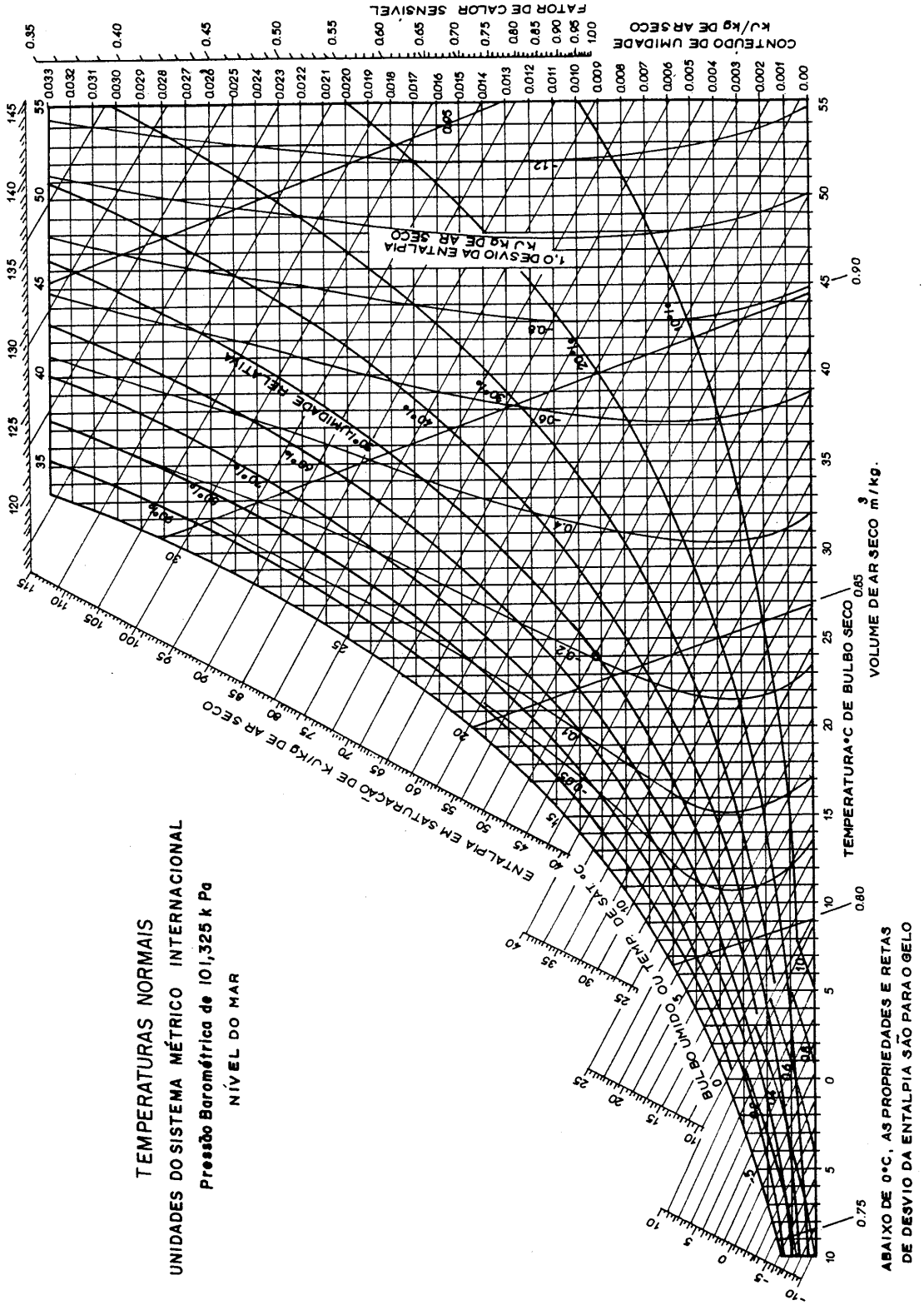


Figura A.6: Diagrama psicrométrico.

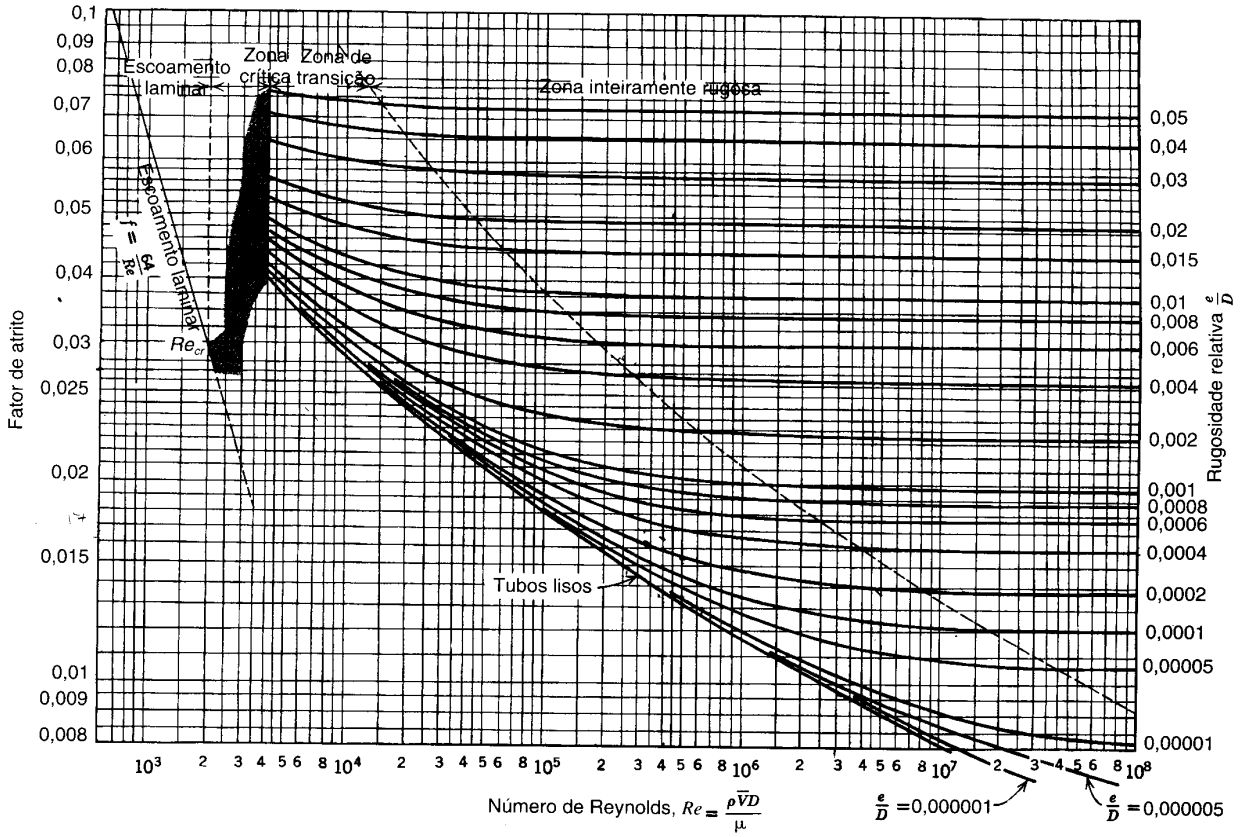


Figura A.7 – Diagrama de Moody (FOX & McDONALD, 1995).

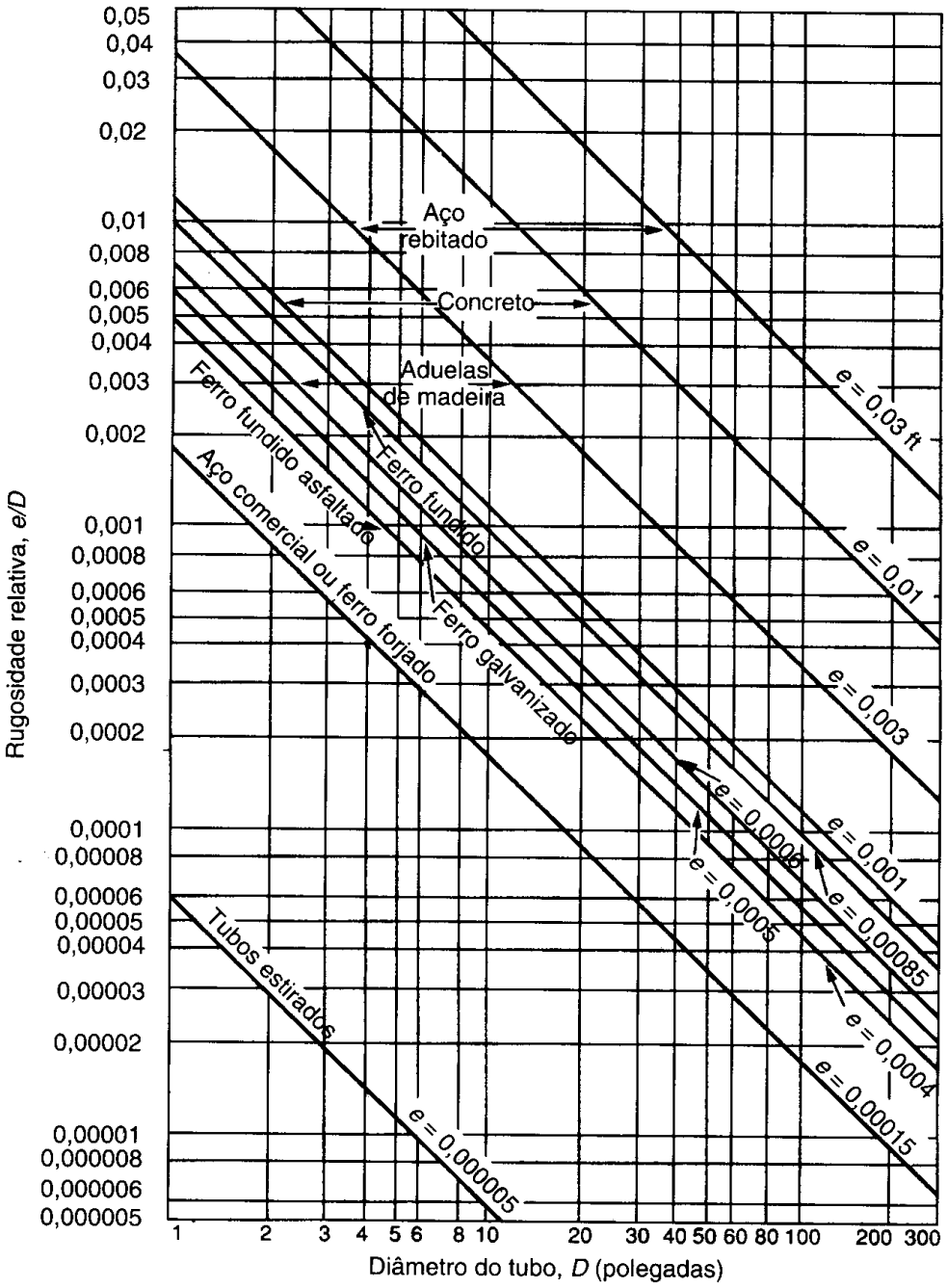


Figura A.8: Curvas de rugosidades (FOX & McDONALD, 1995).