

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da Tese de Doutorado defendida por Paulo Ademar Martins Leal e aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de maio de 1997. Campinas, 18 de abril de 1997.


Presidente da Banca

AValiação ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA GERADOR DE PROCESSOS PSICROMÉTRICOS

Por : **PAULO MARTINS LEAL**

ORIENTADOR : **Prof. Dr. JOSÉ TADEU JORGE**

Tese apresentada à FEAGRI-UNICAMP como cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na Área de Concentração: Pré-Processamento de Produtos Agropecuários.

001997.1

MARÇO DE 1997
CAMPINAS, SP



UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	TUNICAMP		
	L473a		
V.	Ex.		
TOMBO BC/	30648		
PROC.	28/97		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	28/05/97		
N.º CPD			

CM-00099357-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Leal, Paulo Martins
L473a Avaliação energética e exergetica de um sistema gerador de processos psicrométricos / Paulo Martins Leal.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: José Tadeu Jorge.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Engenharia Térmica. 2. Análise térmica. 3. Processos irreversíveis. 4. Higrometria. I. Jorge, José Tadeu. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Dedico este trabalho à minha querida mulher , **VANESSA**, pela **irreversibilidade**,

quase nula, em todos os sentidos e aos meus filhos, **GIOVANNA, VITHOR** e

BRUNO, fontes inesgotáveis de energia, alegria e preocupação;

lembranças constantes durante o desenvolvimento desta

pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. **JOSÉ TADEU JORGE**, amigo e orientador, por acreditar, apoiar e dar liberdade na escolha e desenvolvimento do tema desta pesquisa; apesar das normas burocráticas;

Ao Prof. Dr. **LUÍS A. B. CORTEZ**, introdutor e defensor do conceito de exergia na Engenharia Agrícola, motivador deste árduo trabalho e pelas participações no comitê de orientação, nas bancas do exame de qualificação e de defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **WALDYR L. R. GALLO**, pela brilhante capacidade de transmitir a difícil teoria Termodinâmica e excelente participação na banca do exame de qualificação;

A Prof^a. Dr^a. **SILVIA A. NEBRA** pela inestimável colaboração na revisão do projeto original, pela transmissão dos conhecimentos de exergia e termo-economia e pelas participações nas bancas de exame de qualificação e de defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **LUIZ H. A. RODRIGUES** pelo sólido domínio e capacidade no uso da informática, peça fundamental para o desenvolvimento dos programas computacionais gerados durante a fase de interpretação dos resultados;

Ao Prof. Dr. **KIL JIN PARK** pelo empréstimo e permissão para reforma e adaptação do equipamento de condicionamento do ar e, pelo auxílio em diversas etapas deste projeto e participações no comitê de orientação e na banca de defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **LUIZ A. H. NOGUEIRA**, pelo apoio e participação na banca de defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **SYLVIO L. HONÓRIO** pela colaboração na definição do produto perecível e suas análises, assim como pela participação na banca do exame de qualificação;

Ao Prof. Dr. **BENEDITO C. BENEDETTI**, Chefe do Departamento de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários, pela liberação de instalações laboratoriais, instrumental e pessoal técnico para as análises dos produtos;

A Prof^a. Dr^a. **MARLENE R. QUEIRÓZ** pelo empréstimo da câmara utilizada nos processos de conservação dos produtos perecíveis;

Ao Prof. Dr. **ROBERTO TESTEZLAF** pelo auxílio durante a fase de análise estatística dos resultados;

Ao Sr. **JOSÉ BENEDITO DOS SANTOS**, técnico, amigo e companheiro de muitas horas, pela excelente experiência nas áreas de sistemas termodinâmicos, eletricidade e hidráulica, o meu mais sincero agradecimento, pois sem ele este trabalho jamais teria saído do papel;

Ao Sr. **JOÃO EVARISTO BERGAMO**, técnico, amigo e companheiro de muitas horas, pela notável experiência em computação gráfica e editoração de textos, minha sincera gratidão, pois sem ele, esta tese jamais estaria impressa;

Aos técnicos do Departamento de Máquinas Agrícolas; **JOSÉ MARIA, ROBERTO, LUIZ e CLAUDIO**, pela atitude profissional, esmero, dedicação e amizade durante a confecção de peças e acessórios para a montagem do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos e implantação do sistema de aquisição de dados;

Aos técnicos do Departamento de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários, **DAGOBERTO, ROSÁLIA, FRANCISCO e ROSA**, pela realização de diversas análises dos produtos perecível e deteriorável; com afinco, precisão e dedicação acima do profissionalismo;

Ao técnico **GERSON A. MEDEIROS** pelo auxílio na confecção dos gráficos de pressão total no SIGEP, utilizando a planilha EXCEL;

Aos colegas **RICARDO e LUIS OTÁVIO**, pela colaboração nas medidas de perda de carga do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos;

Ao Eng^o. **MÁRIO A. S. CORRÊA**, diretor da SEMENTES SEMEL LTDA., pela doação de sementes de soja para a fase experimental deste trabalho;

As instituições de financiamento de pesquisa: **FAPESP** (Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo), **FAEP** (Fundo de Apoio ao Ensino e a Pesquisa da UNICAMP) e **CNPq** (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento), pelo suporte financeiro; pois sem estas, não haveria a possibilidade de realização deste trabalho;

Aos **AMIGOS** do Departamento de Construções Rurais e da Faculdade de Engenharia Agrícola pelo apoio, compreensão e convívio;

À minha mãe, **LUCY**, aos meus irmãos e respectivas famílias, principalmente ao **JOSÉ CARLOS**, pelo apoio espiritual e material, amizade e amor;

Ao meu sogro **ALAOR**, à minha sogra **ELZA**, e aos meus cunhados **VINICIUS e TIAGO** pelo carinho, apoio e amizade e, cuidados e paciência para com meus filhos, principalmente, ao Vithor e;

FINALMENTE, a **TODOS**, que direta ou indiretamente auxiliaram, torceram e, principalmente, não atrapalharam, meus sinceros agradecimentos.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE GRÁFICOS.....	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO.....	xxv
ABSTRACT	xxvii
I. INTRODUÇÃO	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 INTRODUÇÃO	5
3.2 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA.....	10
3.3 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA	14
3.3.1 Introdução	14
3.3.2 Processos em regime permanente.....	15
3.3.3 Irreversibilidades	16
3.3.4 Geração de entropia.....	20
3.4 DEFINIÇÃO E CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS	37
3.5 DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS DETERIORÁVEIS E PERECÍVEIS	52
3.6 CONCLUSÃO.....	57

IV. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.1 MATERIAL.....	59
4.1.1 Introdução.....	59
4.1.2 Sistema de condicionamento de ar	59
4.1.3 Sistema gerador de processos psicrométricos	62
4.1.4 Sistema de aquisição de dados e monitoramento.....	71
4.1.5 Instrumental de apoio	72
4.1.6 Produtos perecível e deteriorável	73
4.2 MÉTODOS.....	74
4.2.1 Introdução.....	74
4.2.2 Processos psicrométricos	74
4.2.2.1 Aquecimento do ar por resistência elétrica.....	74
4.2.2.2 Aquecimento e umidificação do ar.....	80
4.2.2.3 Umidificação e aquecimento do ar	84
4.2.2.4 Resfriamento e desumidificação do ar	87
4.2.2.5 Resfriamento do ar por água gelada	89
4.2.2.6 Resfriamento evaporativo do ar.....	91
4.2.2.7 Mistura adiabática de duas correntes de ar.....	94
4.2.3 Estudo de casos	98
4.2.3.1 Introdução.....	98
4.2.3.2 Produto perecível.....	99
4.2.3.2.1 Processo de conservação do produto, via resfriamento do ar por contato direto	101
4.2.3.2.2 Processo de conservação do produto, via resfriamento do ar por água gelada	102
4.2.3.2.3 Processo de conservação do produto, via resfriamento evaporativo do ar.....	104
4.2.3.3 Produto deteriorável	105
4.2.3.3.1 Processo de conservação do produto, via secagem a altas vazões, por aquecimento do ar com resistências elétricas	107
4.2.3.3.2 Processo de conservação do produto, via secagem por resfriamento do ar, através do contato direto com o evaporador aletado.....	110
4.2.3.3.3 Processo de conservação do produto, via secagem a baixas vazões, por aquecimento do ar com resistências elétricas	113

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO	115
5.1 APRESENTAÇÃO	115
5.2 RESULTADOS	115
5.2.1 Introdução	115
5.2.2 Processos Psicrométricos	116
5.2.2.1 Aquecimento do ar via resistências elétricas.....	116
5.2.2.2 Aquecimento e umidificação do ar por água quente	118
5.2.2.3 Umidificação e aquecimento do ar	120
5.2.2.4 Resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado	122
5.2.2.5 Resfriamento do ar por água gelada	124
5.2.2.6 Resfriamento evaporativo do ar	126
5.2.2.7 Mistura adiabática de duas correntes de ar	128
5.2.2.7.1 - Caso A.....	128
5.2.2.7.2 - Caso B.....	131
5.2.3 Estudos de casos	134
5.2.3.1 Produto Perecível	134
5.2.3.1.1 Conservação de produto perecível via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, realizado entre 27/3 e 24/4/96	134
5.2.3.1.2 Conservação do produto perecível através do resfriamento do ar por água gelada, realizado entre 29/4 e 13/5/96	139
5.2.3.1.3 Conservação do produto perecível via resfriamento evaporativo do ar, realizado entre 15/5 e 29/5/96	143
5.2.3.2 Produto Deteriorável.....	149
5.2.3.2.1 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, a altas vazões, realizado em 31/5/96	149
5.2.3.2.2 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, realizado em 5/6/96	156
5.2.3.2.3 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, a baixas vazões, realizado em 6/6/96.....	161
5.3 DISCUSSÃO	167
5.3.1 Introdução	167
5.3.2 Processos Psicrométricos	167
5.3.2.1 Aquecimento do ar por resistências elétricas.....	167
5.3.2.2 Aquecimento e umidificação do ar por água quente	167

5.3.2.3 Umidificação e aquecimento do ar	168
5.3.2.4 Resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.....	169
5.3.2.5 Resfriamento do ar por água gelada	169
5.3.2.6 Resfriamento evaporativo do ar.....	170
5.3.2.7 Mistura adiabática de duas correntes de ar.....	170
5.3.2.7.1 - Caso A.....	170
5.3.2.7.2 - Caso B.....	170
5.3.2.8 Síntese dos resultados obtidos para os processos psicrométricos	171
5.3.3 Estudos de Casos.....	172
5.3.3.1 Produto perecível.....	172
5.3.3.1.1 Conservação do tomate cereja, via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado	172
5.3.3.1.2 Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento do ar por água gelada`	177
5.3.3.1.3 Conservação do produto perecível: tomate cereja, via resfriamento evaporativo do ar	182
5.3.3.1.4 Análise estatística entre os processos de conservação realizados pelo SIGEP	191
5.3.3.2 Produto Deteriorável.....	200
5.3.3.2.1 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar via resistências elétricas aletadas, com velocidade máxima do ar de 3,5 m/s	200
5.3.3.2.2 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado	203
5.3.3.2.3 Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar via resistências elétricas aletadas, com velocidade do ar (até 1,5 m/s)	205
5.3.3.3 Síntese dos resultados obtidos para os estudos de casos.....	208
VI. CONCLUSÕES	209
VII. BIBLIOGRAFIA.....	213

APÊNDICES.....	221
AP-01 Características físicas do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos	222
AP-02 Características técnicas dos principais equipamentos utilizados	237
AP-03 Determinação da pressão total no SIGEP.....	241
AP-04 Curvas de calibração dos termopares e sistemas utilizados	245
AP-05 Resultados globais das avaliações energéticas e exergéticas dos diferentes processos gerados pelo SIGEP	252

ANEXOS	255
AN-01 Determinação do estado e propriedades termodinâmicas das substâncias	256
AN-02 Cálculo das propriedades termodinâmicas	264

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Português

Letras maiúsculas:

A = área, m²

B_o = parâmetro (número), adimensional

\bar{C} = velocidade molecular média aleatória, m/s

D = diâmetro, m

D_c = diâmetro de colisão, Å

D = derivada substantiva, adimensional

\dot{E} = fluxo de energia, J/s (ou kJ/s)

E_x, \dot{E}_x = exergia (J) ou fluxo de exergia, J/s (ou kJ/s)

G = velocidade mássica, kg/m².s

I, \dot{I} = irreversibilidade ou fluxo de irreversibilidade, J/s (ou kJ/s)

K = escala de temperatura absoluta, sistema internacional (Kelvin)

L = comprimento, m

M = massa molecular, kg/kgmol

N = moléculas por unidade de volume, mol/m³

N_s = número de geração de entropia, adimensional

Nu = número de Nusselt, adimensional

P = pressão, Pa (ou kPa)

PATML = pressão atmosférica local, Pa (ou kPa)

Pe = número de Peclet, adimensional

Pr = número de Prandtl, adimensional

Q, \dot{Q} = energia calorífica (J) ou fluxo, J/s (ou W)

R = constante universal dos gases, J/kg.K

Re = número de Reynolds, adimensional

S = entropia, J/kg.K

\dot{S}'_{ger} = taxa de geração de entropia por unidade de comprimento, J/s.K.m (ou W/m.K)

\dot{S}''_{ger} = taxa de geração de entropia por unidade de área, J/s K m² (ou W/m² K)

\dot{S}'''_{ger} = taxa de geração de entropia por unidade de volume, J/s K m³ (ou W/m³ K)

SIGEP = Sistema Gerador de Processos Psicrométricos

St = número de Stanton, adimensional

T = temperatura absoluta, K

TBSC = temperatura de bulbo seco, °C

TBUC = temperatura de bulbo úmido, °C

U = energia interna, J (ou kJ)

V = volume, m³

W = trabalho, J

W = umidade absoluta ou específica, kg_v/kg_a

Z = fator de compressibilidade

Z = produto do número de moléculas por volume pela velocidade média, mol/m².s

Alfabeto Português

Letras minúsculas:

c = calor específico, J/kg.K

c_p = calor específico, a pressão constante, J/kg.K

c_v = calor específico, a volume constante, J/kg.K

d = diferencial, adimensional

e = energia específica, J/kg

f = fator de atrito, adimensional

g = aceleração da gravidade, m/s²

h = entalpia específica, J/kg

h⁰ = entalpia, J/kg

\bar{h} = coeficiente global de transferência de calor, W/m².K

k = coeficiente de transferência de calor por condução, W/m.C

\ln, \log = logaritmo, base neperiana

m, \dot{m} = massa ou fluxo mássico, kg (ou kg/s)

ρ_m = perímetro molhado, m

q, \dot{q} = energia (J/kg) ou fluxo calorífico específico, J/kg.s

r = raio, m

s = entropia específica, J/kg.K

t = temperatura, °C

t^* = temperatura termodinâmica de bulbo úmido, °C

t = tempo

u = energia interna específica, J/kg.s (ou W/kg)

v = velocidade, m/s

v = volume, m³

w, \dot{w} = trabalho (J/kg) ou fluxo de trabalho específico, J/s.kg (ou W/kg)

\tilde{w} = umidade absoluta ou específica molar, mol de H₂O/mol de ar seco

x = concentração, adimensional

z = altura, m

Alfabeto Grego

Letras maiúsculas:

Δ = diferencial, adimensional

Φ = dissipação viscosa,

Θ = parâmetro multiplicativo em viscosidade de misturas, adimensional

Σ = somatório

Ω_μ = integral de colisão, adimensional

Ψ = razão de distribuição de irreversibilidade, adimensional

Alfabeto Grego**Letras minúsculas**

α = difusividade térmica, m^2/s

δ = distância da colisão entre moléculas, na direção do eixo positivo das ordenadas, m

ε = eficiência energética, decimal ou porcentagem

ε = energia característica de interação entre moléculas, ergs

ϕ = umidade relativa, decimal ou porcentagem

ζ = grau de saturação, adimensional

η = eficiência exergética, decimal ou porcentagem

φ = razão entre entropias geradas, adimensional

κ = constante de Boltzmann, $1,38 * 10^{-18}$ ergs/K

λ = distância média entre colisões de moléculas, m

μ = viscosidade dinâmica, $N.s/m^2$

ν = volume específico, m^3/kg

π = constante, 3,141569....

θ = eixo angular, coordenadas esférica e cilíndrica

ρ = densidade, kg/m^3

σ = diferencial de temperatura, $\Delta T/T$, adimensional

τ = razão de temperatura, T_2/T_1 , adimensional

ν = viscosidade cinemática, m^2/s

Outros Símbolos

Maiúsculos:

∇ = gradiente, adimensional

Minúsculos:

∂ = derivada parcial, adimensional

Subscritos

Maiúsculos:

A = aquecimento

B.H. = Bomba Hidráulica

H = quente, alta

H₂O = água

K = Kotas

L = fria, baixa

PECBH = potência elétrica requerida pela bomba hidráulica

PECSR = potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração

Q = fonte energética

R = resfriamento

RAG = resistência elétrica para aquecimento da água

RAR = resistência elétrica para aquecimento do ar

R₁₂ = refrigerante diclorodifluormetano, CCl₂F₂

SR = sistema de refrigeração

T = tradicional

U = umidificação

W = trabalho

Subscritos**Minúsculas:**

a = ar seco

ap = aspersor

atm = atmosférica

au = ar úmido

bs = base seca; bulbo seco

bu = base úmida; bulbo úmido

c = crítica

d = destruída

e = entrada, externo

eo = eixo de origem

fi = fluido incompressível

fg = vaporização

ger = gerada, geração

h = hidráulico

i = interno; entrada

ig = sublimação

l= líquido

m = médio, molhado

máx = máxima

meio = meio, circunvizinhança

o, 0 = ambiente, meio, referência

p = perdido, pressão constante

po = ponto de orvalho

pt = ponto triplo

r = eixo diametral, coordenadas cilíndricas e esféricas

rev = reversível

s = saída; seco; saturado

t = tanque, câmara de condicionamento 1; total

Tbu = temperatura de bulbo úmido

T_{po} = temperatura de ponto de orvalho

v = volume constante, vapor

v.c. = volume de controle

viz = vizinhança

x = eixo das abcissas, coordenada cartesiana

y = eixo das ordenadas, coordenada cartesiana

z = eixo da profundidade, coordenadas cartesiana e cilíndrica

1; 2; 3 = condições de contorno, pontos 1, 2 e 3

ϕ = razão de distribuição de irreversibilidade, adimensional

θ = eixo angular, coordenada cilíndrica

LISTA DE FIGURAS

4.1.2.1. Esquema da Unidade de Condicionamento de Ar	60
4.1.2.2. Detalhes das Resistências Elétricas e Placas Defletoras do Ar.....	61
4.1.3.1.1. Visualização do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP)	62
4.1.3.1.2. Vista em corte do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP)	63
4.1.3.2. Visualização do Circuito de Refrigeração.....	64
4.1.3.3. Visualização do Circuito de Umidificação.....	65
4.1.3.4. Visualização do Circuito de Circulação de AR	66
4.1.3.5. Visualização do Sistema de Aquecimento	67
4.1.3.6. Visualização das Câmaras de Condicionamento	69
4.1.3.7. Visualização dos Painéis de Acionamento e Controle	70
4.2.2.1. Esquema simplificado do processo de aquecimento do ar por resistência elétrica e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.	75
4.2.2.2. Esquema do processo de aquecimento e umidificação e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.....	81
4.2.2.3. Esquema do processo de umidificação e aquecimento e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.....	85
4.2.2.4. Esquema do processo de resfriamento por expansão direta e respectivo esboço do estado inicial e final na carta psicrométrica.	88
4.2.2.5. Esquema do processo de resfriamento do ar por água gelada e respectivo diagrama psicrométrico do estado inicial e final.....	90
4.2.2.6. Esquema do processo de resfriamento evaporativo do ar e respectivo resultado em diagrama psicrométrico do estado inicial e final.	92
4.2.2.7.1. Esquema do processo de mistura de duas correntes de ar e respectivo diagrama psicrométrico dos estados iniciais e final- caso A.....	95
4.2.2.7.2. Esquema do processo de mistura adiabática de duas correntes de ar e esboço do diagrama psicrométrico com os estados iniciais e final - caso B	97
4.2.3.2.1. Esquema do processo de resfriamento do ar, por contato direto com evaporador aletado de expansão direta, na conservação do produto pericível	102
4.2.3.2.2. Esquema do processo de resfriamento do ar, por água gelada, para fins de conservação do produto pericível.....	103

4.2.3.2.3. Esquema do processo de resfriamento do ar evaporativamente, com a finalidade de conservação do produto perecível.	105
4.2.3.3.1. Esquema do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas aplicados na conservação do produto deteriorável e esboço do diagrama psicrométrico com os estados dos pontos 1, 2 e 3 do volume de controle.	108
4.2.3.3.2. Esquema do processo de resfriamento do ar, por contato direto com evaporador aletado, na conservação do produto deteriorável e esboço do diagrama psicrométrico com os estados dos pontos 1, 2 e 3 do volume de controle.	111
AP - 1.1. Vista geral em 3D do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP) sem apresentar os painéis de controle, instrumentação e proteção.....	223
AP - 1.2. Vista frontal do SIGEP com indicação de alguns de seus componentes	224
AP - 1.3. Vista geral lateral em 3D do SIGEP, com a indicação de alguns de seus componentes.....	225
AP - 1.4. Vista geral posterior em 3D do SIGEP, com a indicação de alguns de seus componentes.....	226
AP - 1.5. Vista geral superior em 3D do SIGEP, com a indicação de alguns de seus componentes e corte em parte do equipamento.....	227
AP - 1.6. Vista frontal do SIGEP, com a localização de alguns termopares.....	228
AP - 1.7. Vista posterior do SIGEP, com a localização de alguns termopares.....	229
AP - 1.8. Vista lateral esquerda do SIGEP, com a localização de alguns termopares.....	230
AP - 1.9. Vista superior do SIGEP, com a localização de alguns termopares.....	231
AP - 1.10. Vista frontal do SIGEP com a indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.....	232
AP - 1.11. Vista posterior do SIGEP com a indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.....	233
AP - 1.12. Vista lateral esquerda do SIGEP com a indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.....	234
AP - 1.13. Vista lateral direita do SIGEP com a indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.....	235
AP - 1.14. Vista em corte da câmara de condicionamento de ar 1 e 2 do SIGEP com a indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm	236

LISTA DE GRÁFICOS

AP - 03.01. Pressão Total do Sistema (pol. H ₂ O) para diferentes vazões (m ³ /s), no percurso n ^o 1.	242
AP - 03.02. Pressão Total do Sistema (pol. H ₂ O) para diferentes vazões (m ³ /s), no percurso n ^o 2.	243
AP - 03.03. Pressão Total do Sistema (pol. H ₂ O) para diferentes vazões (m ³ /s), no percurso n ^o 3.	243
AP - 03.04. Pressão Total do Sistema (pol. H ₂ O) para diferentes vazões (m ³ /s), no percurso n ^o 4.	244
AP - 03.05. Pressão Total do Sistema (pol. H ₂ O) para diferentes vazões (m ³ /s), no percurso n ^o 5.	244
AP - 04.01. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo J usados durante o experimento.	246
AP - 04.02. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo J, padrão e experimental.	247
AP - 04.03. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo K usados durante o experimento.	248
AP - 04.04. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo K padrão e experimental.	249
AP - 04.05. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo T usados durante o experimento.	250
AP - 04.06. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo T padrão e experimental.	251

LISTA DE TABELAS

5.2.2.1.1. Resultados da avaliação energética e exergética do processo psicrométrico de aquecimento do ar via resistências elétricas; com velocidade do ar de 0,10 m/s e potência elétrica das resistências de 616 W.	116
5.2.2.1.2. Resultados da avaliação energética e exergética do processo psicrométrico de aquecimento do ar via resistências elétricas; com velocidade do ar de 3,00 m/s e potência elétrica das resistências de 2332 W.	117
5.2.2.2.1. Resultados do processo psicrométrico de aquecimento e umidificação do ar por água quente com velocidade do ar de 0,25 m/s e potência elétrica requerida pelas resistências da água de 376 W, considerando o efeito da potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1025 W.	118
5.2.2.2.2. Resultados do processo psicrométrico de aquecimento e umidificação do ar por água quente com velocidade do ar de 0,50 m/s e potência elétrica requerida pelas resistências da água de 509 W, desprezando o efeito da potência elétrica requerida pela bomba hidráulica.	119
5.2.2.3.1. Resultados do processo psicrométrico de umidificação e aquecimento do ar, com velocidade do ar de 0,25 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 608 W e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	120
5.2.2.3.2. Resultados do processo psicrométrico de umidificação e aquecimento do ar, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2232 W e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	121
5.2.2.4.1 Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 0,25 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.	122
5.2.2.4.2 Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.	123
5.2.2.5.1. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por água gelada com velocidade do ar de 0,25 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	124
5.2.2.5.2. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por água gelada com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1000 W.	125

5.2.2.6.1. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento evaporativo do ar com velocidade do ar de 0,25 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1025 W.	126
5.2.2.6.2. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento evaporativo do ar com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1025 W.	127
5.2.2.7.1.1. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,25 m/s.	128
5.2.2.7.1.2. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1,00 m/s.	129
5.2.2.7.1.3. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1,25 m/s.	130
5.2.2.7.2.1. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,50 m/s.	131
5.2.2.7.2.2. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,75 m/s.	132
5.2.2.7.2.3. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1,50 m/s.	133
5.2.3.1.1.1. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 0,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.	134
5.2.3.1.1.2. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 1,00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.	135
5.2.3.1.1.3. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 2,00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.	136
5.2.3.1.1.4. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.	137
5.2.3.1.1.5. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação na geladeira a 6 ⁰ C.	137
5.2.3.1.1.6. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	138

5.2.3.1.1.7. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação utilizando os três tratamentos diferentes.	138
5.2.3.1.2.1. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por água gelada, com velocidade do ar de 1,25 m/s e, potências elétricas requeridas pelo sistema de refrigeração de 975 W e pela bomba hidráulica de 1075 W.	139
5.2.3.1.2.2. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por água gelada, com velocidade do ar de 1,30 m/s e, potências elétricas requeridas pelo sistema de refrigeração de 900 W e pela bomba hidráulica de 1050 W.	140
5.2.3.1.2.3. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.	141
5.2.3.1.2.4. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente de geladeira na temperatura de 6 ⁰ C.	141
5.2.3.1.2.5. Resultados das análises de ⁰ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com o processo de resfriamento do ar por água gelada.	142
5.2.3.1.2.6. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, para os tratamentos ambiente externo e SIGEP, e estágio de maturação verde e colorido para o tratamento em geladeira, obtidos durante o processo de conservação.	142
5.2.3.1.3.1. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	143
5.2.3.1.3.2. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 2,00 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	144
5.2.3.1.3.3. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1150 W.	145

5.2.3.1.3.4. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 2,00 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.	146
5.2.3.1.3.5. Resultados das análises de ° BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.	147
5.2.3.1.3.6. Resultados das análises de ° BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente de geladeira a 6 ° C.	147
5.2.3.1.3.7. Resultados das análises de ° BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com o processo de resfriamento evaporativo do ar.	148
5.2.3.1.3.8. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação nos três tratamentos distintos.	148
5.2.3.2.1.1. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.	149
5.2.3.2.1.2. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.	150
5.2.3.2.1.3. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.	151
5.2.3.2.1.4. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.	152
5.2.3.2.1.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	153

5.2.3.2.1.6. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	153
5.2.3.2.1.7. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	153
5.2.3.2.1.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	154
5.2.3.2.1.9. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	154
5.2.3.2.1.10. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	154
5.2.3.2.1.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	155
5.2.3.2.1.12. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	155
5.2.3.2.1.13. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.	155
5.2.3.2.2.1. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 3,00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.	156
5.2.3.2.2.2. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 3,00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.	157
5.2.3.2.2.3. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	158

5.2.3.2.2.4. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	158
5.2.3.2.2.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	158
5.2.3.2.2.6. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	159
5.2.3.2.2.7. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	159
5.2.3.2.2.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	159
5.2.3.2.2.9. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	160
5.2.3.2.2.10. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	160
5.2.3.2.2.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.	160
5.2.3.2.3.1. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de aquecimento de 2396 W.	161
5.2.3.2.3.2. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de aquecimento de 2396 W.	162
5.2.3.2.3.3. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.....	163

5.2.3.2.3.4. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	163
5.2.3.2.3.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9 utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	163
5.2.3.2.3.6. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	164
5.2.3.2.3.7. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	164
5.2.3.2.3.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; utilizadas após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	164
5.2.3.2.3.9. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	165
5.2.3.2.3.10. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	165
5.2.3.2.3.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; utilizadas após processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.	165
5.3.2.8.1. Valores das eficiências energéticas e exergéticas mínimas e máximas e coeficiente de relação médio para os diferentes processos psicrométricos.	171
5.3.3.1.1.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}\text{Brix}$, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	172
5.3.3.1.1.2. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}\text{Brix}$, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	172
5.3.3.1.1.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	173
5.3.3.1.1.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	173
5.3.3.1.1.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	173

5.3.3.1.1.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	174
5.3.3.1.1.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	174
5.3.3.1.1.8. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	174
5.3.3.1.1.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ BRIX, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	175
5.3.3.1.1.10. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação: maduro (colorido).	175
5.3.3.1.1.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	175
5.3.3.1.1.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	176
5.3.3.1.1.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	176
5.3.3.1.1.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	176
5.3.3.1.1.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	177
5.3.3.1.1.16. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).....	177
5.3.3.1.2.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	178
5.3.3.1.2.2. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	178
5.3.3.1.2.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	178
5.3.3.1.2.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	178
5.3.3.1.2.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	179
5.3.3.1.2.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	179
5.3.3.1.2.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	179

5.3.3.1.2.8. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	180
5.3.3.1.2.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	180
5.3.3.1.2.10. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ BRIX (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	180
5.3.3.1.2.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	181
5.3.3.1.2.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	181
5.3.3.1.2.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	181
5.3.3.1.2.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	181
5.3.3.1.2.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	182
5.3.3.1.2.16. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).	182
5.3.3.1.3.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	183
5.3.3.1.3.2. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	183
5.3.3.1.3.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	183
5.3.3.1.3.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	184
5.3.3.1.3.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	184
5.3.3.1.3.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	184
5.3.3.1.3.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	185
5.3.3.1.3.8. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	185
5.3.3.1.3.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	185

5.3.3.1.3.10. Tabela de Análise de Variância para a variável ⁰ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	186
5.3.3.1.3.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	186
5.3.3.1.3.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	186
5.3.3.1.3.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	187
5.3.3.1.3.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	187
5.3.3.1.3.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida U _{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	187
5.3.3.1.3.16. Tabela de Análise de Variância para a variável U _{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).	188
5.3.3.1.3.17. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ⁰ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	188
5.3.3.1.3.18. Tabela de Análise de Variância para a variável ⁰ BRIX, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	188
5.3.3.1.3.19. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	189
5.3.3.1.3.20. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	189
5.3.3.1.3.21. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável -AT- (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	189
5.3.3.1.3.22. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).....	190
5.3.3.1.3.23. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida U _{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	190
5.3.3.1.3.24. Tabela de Análise de Variância para a variável U _{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).	190
5.3.3.1.4.1.. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ⁰ BRIX, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	191
5.3.3.1.4.2.. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável ⁰ BRIX, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	191
5.3.3.1.4.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.	192

5.3.3.1.4.4. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável pH, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	192
5.3.3.1.4.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	193
5.3.3.1.4.6. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável Acidez Titulável - AT - (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	193
5.3.3.1.4.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - U _{B.U.} - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	193
5.3.3.1.4.8. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável Umidade em base úmida U _{B.U.} (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	194
5.3.3.1.4.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ⁰ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro.	194
5.3.3.1.4.10. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável ⁰ BRIX, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	195
5.3.3.1.4.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro.	195
5.3.3.1.4.12. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável pH, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	195
5.3.3.1.4.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro.	196
5.3.3.1.4.14. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável AT (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	196
5.3.3.1.4.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - U _{B.U.} - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.	197
5.3.3.1.4.16. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável U _{B.U.} (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H ₂ O.G. e R.E.A.	197
5.3.3.2.1.1. Resultados da média, desvio padrão e soma da variável U _{B.U.} (%), quando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1 ⁰ C e processo de secagem através de resistências elétricas com velocidade máxima de 3,5 m/s.	200

5.3.3.2.1.2.	Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 1,5; 2,5 e 3,5 m/s (BLOCOS).	201
5.3.3.2.1.3.	Resultados da análise de variância para a variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao primeiro teste de conservação.	201
5.3.3.2.2.1.	Resultados da média, desvio padrão e soma da variável $U_{B.U.}$ (%), uando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1°C e processo de secagem através de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado com velocidade média de 3,0 m/s.	203
5.3.3.2.2.2.	Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 1,0; 2,0 e 3,0 m/s (BLOCOS).	203
5.3.3.2.2.3.	Resultados da análise de variância para a variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao segundo teste de conservação.	204
5.3.3.2.3.1.	Resultados da média, desvio padrão e soma da variável $U_{B.U.}$ (%), quando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1°C e processo de secagem através de aquecimento do ar por resistências elétricas com velocidades de até 1,50 m/s.	205
5.3.3.2.3.2.	Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s (BLOCOS).	205
5.3.3.2.3.3.	Resultados da análise de variância para a variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao terceiro teste de conservação.	206
5.3.3.3.1.	Valores das eficiências energéticas e exergéticas mínimas e máximas e coeficiente de relação médio para os estudos de casos com produtos perecíveis e deterioráveis.	208

RESUMO

Processos psicrométricos são muito usados na Engenharia Agrícola, para o condicionamento do ar, com a finalidade de manter ambientes climatizados de maneira adequada para conservar produtos agrícolas, por mais tempo e com qualidade.

Este trabalho teve como objetivo principal a aplicação da metodologia de avaliação dos processos psicrométricos (aquecimento do ar por resistências elétricas; aquecimento e umidificação do ar por água quente; umidificação e aquecimento do ar; resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado; resfriamento do ar por água gelada; resfriamento evaporativo do ar e; finalmente, dois processos distintos de mistura adiabática de duas correntes de ar) utilizando os conceitos definidos pela combinação do 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica: exergia e irreversibilidade, num sistema adaptado para a geração dos processos psicrométricos descritos acima; comparando-se as eficiências energéticas com as eficiências exergeticas.

Procurou-se, ainda, aplicar tal metodologia em estudos de casos de conservação, primeiro, do produto perecível: tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* Mill.) através dos processos psicrométricos de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar. Segundo, do produto deteriorável: sementes de soja (*Glycine max.*) via aquecimento do ar por resistências elétricas com altas vazões, resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado e, finalmente, aquecimento do ar por resistências elétricas com baixas vazões.

Com equipamentos e instrumental adequados, variou-se, basicamente, em cada processo, gerado pelo Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP), as vazões e as potências elétricas requeridas pelos diferentes sistemas de condicionamento do ar e, com um sistema de aquisição de dados acoplado a um microcomputador, obteve-se, principalmente, as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido de pontos

estratégicos, dentro e fora do volume de controle, a fim de efetuar as análises energética e exergética.

Como resultado principal, pode-se afirmar que a metodologia de avaliação pela 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica aplicada em processos psicrométricos de condicionamento de ar é tecnicamente viável. Notou-se, ainda, através dos resultados obtidos, que a avaliação baseada exclusivamente na 1ª Lei da Termodinâmica (avaliação energética), em quase a totalidade dos processos gerados pelo SIGEP, era menos rigorosa que a avaliação exergética; fornecendo com isso uma falsa idéia da real capacidade de realizar trabalho de um sistema, pois apresentava valores de eficiências energéticas, quase sempre, muito superiores daqueles calculados pela avaliação exergética.

Pode-se concluir, também, que os equipamentos, acoplados ao SIGEP e, responsáveis, principalmente, pela mudança nas condições do ar de entrada, apresentaram um alto índice de irreversibilidade devido ao fato de terem sido dimensionados, exclusivamente, com a finalidade de atingir uma condição psicrométrica específica e não, de serem eficientes, do ponto de vista termodinâmico.

Finalmente, tanto para o estudo de caso com o produto perecível quanto para o estudo de caso com o produto deteriorável, a metodologia de avaliação exergética mostrou-se, tecnicamente viável e de tão fácil uso quanto a metodologia de avaliação energética.

ABSTRACT

Psychrometric processes are well used in Agricultural Engineering to conditioning air for environment control of animals and plants, on processes of drying foods, and finally on fruits and vegetables preserving facilities.

This research had, as major objective, the application of methodology to evaluate the following psychrometric processes: heating air by electrical resistances; heating and humidifying air by hot water; humidifying and heating air; cooling and dehumidifying moist air by direct contact with cooling coil; cooling and dehumidifying moist air by chilled water; evaporative air cooling; and, finally, two different adiabatic mixings of two streams of moist air; through the use of theory which combines the first and the second principles of Thermodynamic: exergy and irreversibility, into an adapted system of generating psychrometric processes. It was possible, also, to compare the results between energetic, and exergetic efficiencies.

The above methodology was applied to study of cases, such as: the conservation of the perishable product: Cherry Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) by using three different psychrometric processes: - cooling moist air by direct contact with cooling coil; - cooling moist air by chilled water; and - evaporative air cooling. And the conservation of deteriorative product: Soybean seeds (*Glycine max.*) by using the following processes: - heating moist air by electrical resistances with high flow; - cooling and dehumidifying moist air by direct contact with cooling coil; and heating air by electrical resistances with low air flow.

With the Psychrometric Processes System Generator (**SIGEP**), and others appropriate apparatuses, where air flow and electrical power from different systems of air conditioning were the most important variables of changing. It was feasible, with the use of a data acquisition system attached to a microcomputer, to obtain data of dry bulb temperature, and the wet bulb temperature from different locations of the SIGEP's control volume. These parameters plus local atmospheric pressure were enough to determine the

state of the air inlet and outlet, which made possible to apply the energetic and exergetic analysis.

The principal result obtained from this research was that the methodology based on the valuation through the first and second law of Thermodynamic was technically viable on the analysis of psychrometric processes.

It can be observed that energetic valuation, in almost every process generated by the SIGEP provided less rigorous criteria than exergetic analysis. Thence it follows that energetic efficiency gave a false idea of the real efficiency of a process, since it showed values, most of the time, much greater than those obtained by the exergetic efficiencies.

It can be concluded also that the equipments attached to the SIGEP had a high level of irreversibilities due to the fact they were designed to meet special psychrometric conditions majorly, and regardless the level of efficiency at that time.

Finally, it was observed that exergetic analysis is also viable to be applied on the study of cases with the perishable and deteriorative products.

INTRODUÇÃO

A cada ano, o Brasil desperdiça alimento suficiente para suprir grande parte das necessidades nutricionais da população carente e desnutrida. Este panorama de perdas de alimentos, se revertido, poderia melhorar, em muito, a condição de alimentação do povo brasileiro. Sem qualidade para exportação, este território, com características excelentes para o desenvolvimento da agricultura, deixa de gerar, também, divisas essenciais para o desenvolvimento nacional. A falta de uso de técnicas e tecnologias adequadas à preservação dos alimentos *in natura* é uma das principais causas do desperdício, BLECHER (1993).

Em 1992, o Brasil produziu uma safra agrícola de 70 milhões de toneladas de grãos dos quais cerca de 20% foram perdidos por falta de manuseio adequado, armazenagem eficiente e transporte correto. São 14 milhões de toneladas de grãos: suficientes para produzir 14 bilhões de refeições, pelas estimativas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), ambos vinculados ao governo federal. Isso significa que o Brasil joga no lixo, anualmente, cerca de US\$ 16 bilhões, correspondentes a 4,5% do seu Produto Interno Bruto (PIB), segundo ABRAVA (1993).

O desperdício de frutas, legumes e hortaliças é ainda mais espantoso: cerca de 30 a 40% apodrecem antes de chegar à mesa do brasileiro. E quando chega, nem sempre possui a qualidade exigida pelos padrões internacionais. Com tanto desperdício, o Brasil gastou US\$ 2 bilhões em 1991 para comprar alimentos no exterior.

Para entender o quadro de desperdício de alimentos neste país é necessário acompanhar a trajetória das perdas, que começa na produção (parte agrícola), passa pela estocagem, transporte, armazenagem e chega aos balcões expositores nos pontos de venda (pós-colheita). Em cada uma dessas etapas, as perdas poderiam ser minimizadas sensivelmente com o uso de técnicas adequadas no manuseio e conservação, além de

uma análise criteriosa dos processos e sistemas envolvidos em cada fase, utilizando avaliações de eficiência técnica e econômica, visando a otimização dos processos e a preservação dos produtos perecíveis e deterioráveis.

Desde a colheita até a comercialização dos produtos, a maioria das etapas envolvidas, com a finalidade de manter a qualidade do alimento, compreende a correta utilização de processos psicrométricos de condicionamento do ar para fim de conservação do produto.

No campo da agricultura o uso de processos psicrométricos é intenso no condicionamento do ar para fins de preservação de produtos agrícolas, assim como na tentativa de manter instalações agropecuárias dentro de um padrão mínimo aceitável.

O objetivo da maioria dos sistemas de condicionamento de ar é levar o ar úmido (mistura de dois componentes: ar seco + vapor de água) a um estado no qual a temperatura e a composição diferem da condição encontrada no ambiente real do ar atmosférico.

Os processos psicrométricos podem, em sua quase totalidade, ser divididos em três grandes grupos: aquecimento, resfriamento e mistura de duas correntes de ar; com desdobramentos de cada um, de acordo com o tipo de equipamento construído ou a finalidade desejada.

A análise de cada processo psicrométrico e do respectivo sistema utilizado pode ocorrer valendo-se dos conceitos da 1ª Lei da termodinâmica, conhecido como avaliação energética ou, através do conhecimento do uso combinado dos conceitos da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, denominado avaliação exergética. Ambas avaliações buscam, por diferentes caminhos, a redução das perdas ou, conseqüentemente, uma otimização do processo. Acredita-se, porém, que a avaliação exergética leva a resultados mais exatos e identifica com mais clareza, dentro de cada sistema, os equipamentos menos eficientes termodinamicamente.

Com a finalidade de tornar a metodologia de avaliação exergética mais acessível aos pesquisadores e técnicos da área agrária desenvolveu-se um equipamento capaz de gerar os seguintes processos psicrométricos: aquecimento, resfriamento e mistura de duas correntes de ar, a fim de comparar ambas as avaliações: energética e exergética; explicitar as facilidades e dificuldades de cada metodologia; verificar as vantagens e desvantagens de cada uma, aplicadas ao condicionamento de ar envolvendo a preservação do produto perecível - tomate cereja- (*Lycopersicon esculentum Mill.*) e do produto deteriorável - semente de soja- (*Glycine max.*), através dos objetivos definidos a seguir.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade principal a aplicação da metodologia de avaliação de processos psicrométricos (aquecimento do ar por resistências elétricas, aquecimento e umidificação do ar por água quente e umidificação e aquecimento do ar; resfriamento do ar por expansão direta, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar e; finalmente, mistura adiabática de duas correntes de ar) utilizando os conceitos definidos pela combinação do 1^a e 2^a Leis da Termodinâmica: exergia e irreversibilidade, num sistema gerador de processos psicrométricos.

Os objetivos secundários são, primeiro, comparar as eficiências energéticas com as exérgicas em cada processo realizado; segundo, aplicar tal avaliação, como estudo de casos, nos processos psicrométricos de resfriamento do ar por expansão direta, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar na preservação do produto perecível -tomate cereja- (*Lycopersicum Esculentum Mill.*), variedade F₁ híbrido SWEET MILLION e dos processos psicrométricos de aquecimento do ar por resistências elétricas e resfriamento do ar por expansão direta na conservação do produto deteriorável -sementes de soja- (*Glycine max.*), variedade FOSCARIN e; finalmente, tornar familiar no campo da Engenharia Agrícola o uso de avaliações que possibilitem a otimização de processos e sistemas, do ponto de vista técnico-econômico.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

Desde a estruturação da Termodinâmica como ciência, na segunda metade do século XIX, o conceito de energia disponível (ou utilizável) aparece esporadicamente, para ser relegado à obscuridade em seguida, tendo sido "redescoberto", principalmente por engenheiros, praticamente já no século XX, CIMBLERIS (1981).

Embora o uso da palavra exergia para designar energia disponível, disponibilidade, capacidade térmica de realizar trabalho ou trabalho máximo realizável seja atribuído a RANT, em 1956, os fundamentos do método exergético foram sugeridos por CARNOT, em 1824, e CLAUSIUS, em 1865; segundo AHERN (1980) e CIMBLERIS (1981).

Segundo BOREL (1979), a teoria da exergia é, agora, largamente reconhecida e extremamente fecunda, pois discorre sobre uma compatibilidade energética que engloba a primeira e a segunda Leis da Termodinâmica. Só essa forma de compatibilidade permite avaliar quantitativamente o que é chamado qualitativamente de degradação de energia. Permite, portanto, calcular com precisão as consequências dos diversos fenômenos de irreversibilidade termodinâmica e conseqüentemente, avaliar corretamente as perdas termodinâmicas de um sistema. BOREL (1979), afirma que só essa forma de análise é conveniente para definir propriamente um rendimento termodinâmico, visto exprimir qualitativamente e não quantitativamente este rendimento.

De modo bem abrangente, a exergia de uma substância é definida como o trabalho máximo realizável por essa substância num meio ambiente, que age como fonte de calor e de matéria, quando, no final desse processo, todos os tipos de matéria que nele tomam parte entram em equilíbrio termodinâmico com os componentes do meio ambiente, CIMBLERIS (1969); BOREL (1979) e FREDRIKSSON (1983).

Quando os parâmetros de estado de uma substância são iguais aos parâmetros de estado do meio ambiente, a capacidade de realizar trabalho dessa substância é nula. O meio ambiente é, portanto, um estado de referência para a disponibilidade energética da substância. Diz-se que o estado de equilíbrio termodinâmico da matéria com o meio ambiente constitui o nível de referência (nível zero) da disponibilidade energética da substância considerada, CIMBLERIS (1969); BOREL (1979) e FREDRIKSSON (1983).

O uso de um ponto comum de referência, tal qual o meio ambiente, como último absorvedor de calor e de trabalho, como base de avaliação, proporciona um meio para comparar, nos aspectos de consumo e de necessidade energética, diferentes tipos de instalações industriais e diferentes equipamentos utilizados para a mesma finalidade, em diferentes regiões deste planeta, AHERN (1980).

Processos ideais reversíveis não ocorrem no mundo real e a transformação de calor em trabalho, ou vice-versa, sempre resulta em perda de algum trabalho (irreversibilidade). A irreversibilidade de um processo é considerada pela segunda lei da Termodinâmica e é expressa pela geração interna de entropia, AHERN (1980) e CIMBLERIS (1980).

No projeto de um novo sistema que envolva geração ou uso de energia, o método exergetico fornecerá informações sobre a melhor seleção dos componentes do projeto e sobre o melhor procedimento de operação. Essas informações poderão ser expressas com base no custo inicial ou operacional das instalações, conservação de energia, versatilidade de uso de combustíveis e poluição, AHERN (1980) e BOREL (1977).

Para analisar exergeticamente um sistema, o primeiro passo é determinar o local em que ocorrem as perdas de trabalho disponível, a magnitude dessas perdas e quais delas, quando corrigidas, podem efetivamente melhorar a eficiência do sistema, BOREL (1979) e AHERN (1980).

A avaliação de processos termodinâmicos, relacionados ao meio rural, tem se intensificado a partir da década de 70 com o drástico aumento do preço do barril de petróleo, que passou de 1 US\$ para 30-40 US\$ em 1982, embora encontre-se, atualmente, em patamar inferior.

Nos dias atuais, torna-se cada vez mais difundida a técnica da avaliação exergetica em sistemas e em processos termodinâmicos (HAYWOOD, 1974 a e b; KESTIN, 1980; NAGHDI, 1980; MORAN, 1982; WALL, 1983; KOTAS, 1985; SZARGUT et alii, 1988 e BEJAN, 1988). No Brasil, já se verifica um gradativo interesse em se aplicar esta técnica (BAHIA, 1985; CORTEZ, 1990; GALLO, 1990; GALLO e MILANEZ, 1990 a e b; SILVA E NEBRA, 1993; SILVA, 1994 e LARSON E CORTEZ, 1995), apesar da dificuldade de sua aceitação, a exemplo do que já ocorrera em outros países, WORSØE - SCHMIDT (1987).

Na avaliação exergética reúne-se os valores quantitativos (1ª Lei da Termodinâmica) e qualitativos (2ª Lei) dos fluxos energéticos, permitindo com isso seu uso como importante ferramenta para otimização técnica e econômica, portanto, mais consistente do ponto de vista termodinâmico, em processos e sistemas no meio rural.

A Exergia (**Ex**) mede a capacidade que um fluxo ou sistema tem de realizar trabalho; quantifica o potencial de causar mudança; não é conservada, mas é irreversivelmente destruída enquanto "alimenta" qualquer processo real. Portanto, é a exergia, não a energia, que possui o valor. Ineficiências são uma consequência da destruição da "energia disponível" (= exergia) ou perdas dos resultantes. Entretanto, a eficiência energética, que em alguns casos pode dar uma aproximação da "verdadeira" eficiência, tem sido erroneamente utilizada para otimizar processos, GAGGIOLI (1983).

Do ponto de vista termodinâmico a capacidade de realizar trabalho provém de um desequilíbrio que pode ocorrer com qualquer "produto" com potencial, (isto é, diferença de voltagem, pressão, temperatura, afinidade química) em realizar um processo, SUSSMAN (1980). Por razões históricas, esta que é a propriedade mais consistente, não tem sido utilizada como ferramenta nas análises, AURACHER (1984).

Exergia é não só um parâmetro de avaliação termodinâmica mas também de otimização. Um processo é termodinamicamente ideal se a exergia se conserva, conseqüentemente, perda de exergia ou irreversibilidade, como é denominada, significa distanciamento do ideal e do ótimo. Dessa maneira, a otimização de um processo termodinâmico implica não exatamente na análise pela conservação de energia (1ª Lei), mas pelo grau de destruição de exergia (1ª e 2ª Leis juntas). Vem daí que, num determinado processo, o objetivo técnico-econômico não é o de se determinar as "perdas" de energia (até porque energia não se perde), mas as perdas ou destruição de exergia (e esta sim se perde, isto é, perda de exergia = irreversibilidade), determinar as fontes e as magnitudes das perdas de exergia é, em última análise, quantificar as perdas de capital, SZARGUT (1980). É importante mencionar, ainda, que as perdas de exergia (ou irreversibilidade) ocorrem principalmente nos processos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), variação de pressão (atrito, expansão, compressão) e reações rápidas, tais como combustão, CORTEZ (1990).

No Brasil, é utilizada uma grande quantidade de energia (óleos combustíveis, GLP, lenha, eletricidade, etc) na conservação e preservação dos alimentos, estando eles na forma *in natura* ou processados, empregando processos psicrométricos, tais como: aquecimento, resfriamento, secagem e/ou desumidificação, resfriamento evaporativo e/ou umidificação e mistura adiabática. Todavia, com a crescente preocupação de minimizar os efeitos causados ao meio ambiente, quer pela devastação das matas nativas como pela emissão de gases poluentes e, também, pelo aumento no preço do barril do petróleo, já

citado anteriormente, houve uma mudança substancial do uso da energia e dos projetos de sistemas e processos em plantas agrícolas e de processamento de alimentos, MOSER e SCHNITZER (1985).

Basicamente, existem dois tipos principais de critérios de desempenho tradicionalmente aplicados em sistemas térmicos; a saber: taxa de conversão de energia, tal como a eficiência térmica global e os coeficientes de desempenho, os quais são usados para a determinação do desempenho de geradores de potência e, taxas envolvendo rendimento real e rendimento ideal, geralmente aplicados a componentes de uma planta agroindustrial. Como exemplo pode-se citar as eficiências isoentrópicas, relações térmicas, eficiências mecânicas, entre outras. Ao formular tais critérios, todas as formas de energia, mesmo estando em diferentes temperaturas, são assumidas como equivalentes e, portanto, não há nenhuma referência feita à 2ª Lei da Termodinâmica, KOTAS (1985).

Recentes desenvolvimentos na análise exergetica permitem a definição de um novo critério de desempenho que oferece algumas vantagens sobre os critérios tradicionais, baseados somente na 1ª Lei da Termodinâmica. Vários pesquisadores, incluindo BOSNJAKOVIC (1965) e FRATZSCHER (1961) propuseram um critério geral baseado no conceito da exergia. SZARGUT e PETELA (1965) definiram eficiências exergeticas para um grande número de sistemas térmicos e HORLOCK (1963/1964) cobriu principalmente sistemas de combustão.

KOTAS (1980), apresenta técnicas gerais utilizando o conceito de exergia para a formulação de critérios de desempenho para uma variedade de sistemas térmicos.

BOCK (1957) foi talvez o primeiro autor a propor uma análise exergetica para processos psicrométricos em condicionamento de ar, utilizando o fator de Carnot e reconhecendo a importância de se introduzir os efeitos da pressão e umidade na exergia do ar.

BULLOCK (1973) volta a analisar exergeticamente os processos psicrométricos através de problemas teóricos determinando os parâmetros através de cartas psicrométricas e tabelas de propriedades do ar úmido, retirados da ASHRAE.

WEPFER et al. (1979) introduz equações mais genéricas para a exergia do ar úmido, todavia com maiores precisões daquelas obtidas por BULLOCK (1973), na solução de exemplos teóricos.

BEJAN (1988) tratou de descrever as exergias do ar seco, do ar úmido e da água, através de equações que facilitam o uso de cálculos via computador.

A análise de sistemas térmicos é usualmente feita por meio de balanços energéticos e avaliações de eficiências energéticas. A eficiência energética (ϵ) de um sistema térmico, obtida a partir da 1ª lei da Termodinâmica é dada pela relação:

$$\varepsilon = [\text{trabalho útil}]/[\text{energia térmica fornecida}] \quad 1$$

As desvantagens de se utilizar apenas o conceito de eficiência definido pelo primeira Lei são:

- considerações apenas do aspecto quantitativo das energias envolvidas;
- estabelecimento de uma simples equivalência entre trabalho e calor, sem considerar a qualidade de energia e as condições em que ele é realizado;
- falta de uma definição minuciosa da grandeza, localização e tipo das perdas envolvidas no processo.

Para superar as limitações das análises através unicamente da 1ª lei da Termodinâmica, desenvolveu-se o conceito de exergia, ou disponibilidade energética. Com base na 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, exergia é definida como o trabalho máximo disponível numa massa, fluida ou sólida, como resultado de sua condição de não-equilíbrio, relativa a uma condição de referência.

A medida de eficiência mais adequada é, portanto, baseada no princípio do trabalho disponível:

$$\eta = [\text{trabalho útil}]/[\text{trabalho disponível}] \text{ ou}$$
$$\eta = [\text{trabalho disponível} - \text{trabalho perdido}]/[\text{trabalho disponível}] \quad 2$$

Assim a minimização do trabalho perdido originará um sistema mais eficiente e é nisso que se baseia o método de análise exergetica.

A utilização do conceito de eficiência exergetica (η) permite:

- a qualificação da energia, possibilitando selecionar, de forma absoluta, a fonte energética mais eficiente para um determinado processo;
- a identificação dos locais de perda (irreversibilidade) exergetica e, em consequência, as condições para melhoria dos processos;
- visto embasar-se na primeira e segunda Leis da Termodinâmica, a otimização dos processos, pela quantificação e qualificação da energia;
- e, finalmente, o levantamento exergetico de uma planta industrial conduz à detecção de falhas no sistema, relacionadas com o mal uso da energia.

3.2 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

A avaliação energética, que está intimamente ligada a 1ª Lei da Termodinâmica: "Princípio de conservação de energia aplicado aos fenômenos envolvendo a produção e absorção de calor", tem a ver com a equivalência da transferência de trabalho e calor como possíveis formas de interações de energia.

Para um sistema fechado (superfície impermeável.: não há passagem de massa pela fronteira do sistema), respeitando a convenção de sinais de uma máquina térmica, isto é, trabalho transferido para fora do sistema e calor transferido para dentro do sistema têm sinais positivos e vice-versa, portanto, para qualquer processo entre dois estados 1 e 2, pode-se descrever a 1ª Lei da Termodinâmica como sendo:

$$\int_1^2 \partial Q - \int_1^2 \partial W = E_2 - E_1 \quad 3$$

ou simplesmente

$$Q_{1,2} - W_{1,2} = E_2 - E_1 \quad 4$$

onde,

$Q_{1,2}$ = transferência de calor, não propriedade, uma interação de energia

$W_{1,2}$ = transferência de trabalho, não propriedade, uma interação de energia

$E_2 - E_1$ = mudança ou variação de energia, propriedade

A variação ou mudança de energia representada pelos termos, $E_2 - E_1$, é uma simplificação de uma expressão geral, onde os termos podem ser distinguidos entre formas identificáveis, macroscopicamente, de energia armazenada e formas não identificáveis macroscopicamente, que por esta razão é chamada de energia interna. Então,

$$E_2 - E_1 = U_2 - U_1 + \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 + mg z_2 - mg z_1 + (\Xi_2 - \Xi_1)_i \quad 5$$

onde

$U_2 - U_1$ = variação de energia interna

$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)m$ = variação de energia cinética

$mg(z_2 - z_1)$ = variação de energia potencial-gravitacional

$(\Xi_2 - \Xi_1)_i$ = outras formas macroscópicas de energia armazenada.

Para um sistema aberto (superfície permeável), isto é, superfície que permite a passagem de fluxo de massa por certas porções da fronteira do sistema, a 1ª Lei da Termodinâmica pode ser demonstrada, explicitando em termos de transferência de energia, via fluxo de massa, conforme equação descrita a seguir:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} = \sum_e \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum_s \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \quad 6$$

onde

$\frac{dE}{dt}$ = variação de energia, por unidade de tempo

\dot{Q} = fluxo de calor

\dot{W} = fluxo de trabalho

$\sum_e \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)$ = somatória das transferências de energia macroscópicas,

entrando no sistema, via fluxo de massa

$\sum_s \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)$ = somatória das transferências de energia macroscópicas,

saindo do sistema, via fluxo de massa

Lembrando que os dois últimos termos do lado direito da equação 6 derivam do fato de

$$\dot{m}(e + Pv) = \dot{m} \left(u + \frac{1}{2} v^2 + gz + Pv \right) \quad 7$$

e que

$$h = u + Pv \quad 8$$

Sabendo-se ainda que, no campo da dinâmica de gases e da mecânica dos fluidos compressíveis, o termo $(h + \frac{1}{2} v^2)$ é reconhecido como a entalpia de estagnação local do fluido, fluindo pelo sistema.

KESTIN (1980), propôs uma generalização, na engenharia, do conceito de entalpia, sob o nome de metalpia (h^0), como se segue,

$$h^0 = e + Pv = h + \frac{1}{2}v^2 + gz \quad 9$$

em que

e = energia específica, J/kg

P = pressão

v = volume

v = velocidade

h = entalpia específica, J/kg

Para um volume de controle, onde a variação de energia permanece constante com relação ao tempo, num estado estável, a equação 6 reduz-se a

$$0 = \sum_e \dot{m} \left(h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) - \sum_s \dot{m} \left(h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) + \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} \quad 10$$

Em muitas das aplicações de modelos do processo em regime permanente existe, geralmente, uma única corrente de fluxo entrando e saindo do volume de controle. Nestes casos pode-se escrever:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad 11$$

e, portanto, equação 10 torna-se igual a

$$\dot{Q}_{v.c.} + \dot{m} \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g z_e \right) = \dot{m} \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g z_s \right) + \dot{W}_{v.c.} \quad 12$$

Dividindo os dois lados da equação 12 por \dot{m} , tem-se

$$q + h_e + \frac{v_e^2}{2} + g z_e = h_s + \frac{v_s^2}{2} + g z_s + w \quad 13$$

onde, por definição

$$q = \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{\dot{m}} \quad 14$$

e

$$w = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m}} \quad 15$$

Na maioria das situações de condicionamento de ar o efeito da energia cinética e da energia potencial são pequenos quando comparados ao da energia térmica e, portanto, podem ser desprezados. Logo a equação 13 se reduz a:

$$q + h_e = h_s + w \quad 13'$$

Nota-se que as unidades de q e w são em J/kg e pode-se definí-los como sendo a transferência de calor e trabalho (exceto trabalho de fluxo) por unidade de massa que entra e sai do volume de controle, para este processo, em regime permanente.

Finalmente, partindo da equação 1, pode-se determinar, nas avaliações energéticas, as eficiências de cada processo, como uma relação entre o trabalho útil e a energia térmica fornecida, através da seguinte formulação genérica:

$$\varepsilon = \frac{w}{q} \quad 16$$

3.3 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA

3.3.1 Introdução

Viu-se, indiretamente, que a 1ª Lei da Termodinâmica determina que a integral cíclica do calor é igual a integral cíclica do trabalho, para um sistema que efetua um ciclo. Todavia a primeira lei não restringe a direção do fluxo de calor e trabalho. Entretanto, sabe-se, por experiência, que pelo fato de um certo ciclo proposto não violar tal enunciado, não quer dizer que tal ciclo possa ocorrer na realidade. Isto deixa claro a necessidade da 2ª Lei da Termodinâmica. Então, verifica-se que um ciclo ocorre quando não há violação tanto da primeira lei quanto da segunda lei da termodinâmica. Genericamente, observa-se que a 2ª lei garante a existência de um dado sentido para a ocorrência de processos.

Os enunciados clássicos da 2ª Lei da Termodinâmica (Kelvin-Planck e Clausius) podem ser reproduzidos da seguinte forma: “é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico” e que “é impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente”. Um aspecto interessante que vem destes enunciados é que é impossível obter um motor térmico com 100% de eficiência, HEVERT & HEVERT (1980).

Um processo seria ideal, também chamado de processo reversível, para um sistema se após ter ocorrido, pudesse ser invertido, não provocando, todavia, nenhuma mudança no sistema e no meio; o que no mundo real não acontece, pois neste encontra-se o atrito, a expansão não resistida, a troca de calor com diferença finita de temperatura e a mistura de duas ou mais substâncias diferentes, que causam a irreversibilidade.

Em vista disto, pode-se, através de procedimento similar àquele aplicado à 1ª Lei da Termodinâmica, utilizar a segunda lei para um volume de controle, KESTIN (1980).

Enuncia-se a 2ª Lei da Termodinâmica para a análise de um sistema, através de formulação, como sendo:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta W_p}{T}$$

17

onde

dS = variação de entropia

δQ = calor total transferido

δW_p = trabalho total perdido

T = temperatura absoluta

Para uma variação de entropia $S_2 - S_1$, num determinado intervalo de tempo, δt , pode-se escrever que

$$\frac{S_2 - S_1}{\delta t} = \frac{1}{\delta t} \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + \frac{1}{\delta t} \left(\frac{\delta W_p}{T} \right) \quad 18$$

Quando se reduz a equação 18 a uma expressão em termos de fluxo, considera-se a influência em cada termo, ao se fazer que δt tenda a zero, obtendo-se a seguinte equação:

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e = \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) + \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{W}_{pv.c.}}{T} \right) \quad 19$$

que vem a ser uma expressão genérica da equação de entropia do segunda Lei da Termodinâmica.

Observa-se que a equação 19 exprime que a taxa de variação de entropia no interior do volume de controle, adicionada ao fluxo líquido, por unidade de tempo, de entropia que sai do volume de controle, é igual a soma de dois termos, o termo relativo ao calor total trocado na superfície de controle e o termo positivo relativo a produção interna de irreversibilidade. Como o último termo da equação acima é, obrigatoriamente, positivo ou nulo e, é difícil, senão for impossível, de ser determinado quantitativamente, a equação 19 é, geralmente, explicitada na seguinte forma:

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e \geq \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) \quad 20$$

3.3.2. Processos em regime permanente

Para processos em regime permanente, onde o volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas, o estado da massa no volume de controle

não varia com o tempo e, a massa que escoar através da superfície de controle, seu fluxo e estado, em cada área discreta de escoamento na superfície de controle, não varia com o tempo, tem-se, portanto, que

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} = 0 \quad 21$$

de modo que, para o processo em regime permanente, a equação 20 se torna

$$\sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e \geq \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) \quad 22$$

onde os fluxos de massa, a taxa de transferência de calor e os estados são todos constantes com relação ao tempo.

Num caso onde, num processo em regime permanente, houver apenas uma área através da qual existe entrada de massa, numa razão uniforme, no volume de controle e, apenas uma área na qual há saída de massa também, numa razão uniforme, pode-se simplificar a equação 22 da seguinte maneira:

$$\dot{m}(s_s - s_e) \geq \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) \quad 23$$

e, tem-se, ainda, que para um processo adiabático, com as mesmas hipóteses anteriores, a seguinte expressão:

$$s_s \geq s_e \quad 24$$

3.3.3 Irreversibilidades

Um outro conceito interessante e necessário na avaliação exérgica é o da Irreversibilidade (I). Pode-se definir a Irreversibilidade como a diferença entre o trabalho reversível W_{rev} e o trabalho realizado no volume de controle, $W_{v.c.}$, então,

$$I = W_{rev} - W_{v.c.} \quad 25$$

A irreversibilidade é nula quando os processos ocorrem de maneira totalmente reversível.

O trabalho reversível pode ser expresso da seguinte maneira:

$$w_{rev} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{m}} = \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \left(h_s - T_0 s_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad 26$$

Deve-se ter em mente que, como cada uma das expressões do trabalho reversível envolve a temperatura do meio, T_0 , AHRENDTS (1980), tal informação deve ser disponível na resolução de qualquer problema GALLO & MILANEZ (1990) e, que neste trabalho a temperatura do meio utilizada foi a temperatura real de entrada no volume de controle, em cada instante, nos diferentes processos e sistemas utilizados.

Definido o trabalho reversível faz-se necessário, agora para a determinação da irreversibilidade, a definição de uma expressão para o trabalho realizado no volume de controle, $W_{v.c.}$, portanto, tem-se

$$\begin{aligned} \dot{W}_{v.c.} = & \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) - \\ & - \left[m_2 \left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \right] + Q_{v.c.} \end{aligned} \quad 27$$

Substituindo-se as equações 26 e 27 na equação 25, obtem-se

$$I = \sum m_s T_0 s_s - \sum m_e T_0 s_e + m_2 T_0 s_2 - m_1 T_0 s_1 - Q_{v.c.} \quad 28$$

que vem a ser uma expressão geral para a irreversibilidade, num processo em regime uniforme. Considerando-se, novamente, dois casos particulares, isto é, o sistema e o processo em regime permanente, tem-se, portanto, duas situações, a primeira, para o sistema:

onde $\sum m_s T_0 s_s = 0$; $\sum m_e T_0 s_e = 0$ e $m_2 = m_1 = m$ e a equação 28 se reduz a

$$I_{12} = m T_0 (s_2 - s_1) - Q_2 \quad 29$$

e, a segunda, para o processo, $m_2 T_0 s_2 = m_1 T_0 s_1$, o que torna a equação 28 simplificada da seguinte forma:

$$I = \sum m_s T_0 s_s - \sum m_e T_0 s_e - Q_{v.c.} \quad 30$$

Há, como pode-se notar, uma comparação possível entre a irreversibilidade I e o princípio do aumento de entropia, isto é,

$$\dot{i} = T_0 \left[\frac{dS_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e - \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T_0} \right] \quad 31$$

e que substituindo-se na expressão acima, a variação com o tempo da entropia do meio, dada por

$$\frac{dS_{viz.}}{dt} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e - \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T_0} \quad 32$$

tem-se, então que a Irreversibilidade pode ser descrita como sendo,

$$\dot{i} = T_0 \left[\frac{dS_{v.c.}}{dt} + \frac{dS_{meio}}{dt} \right] \quad 33$$

Repara-se que a determinação de uma eficiência exergética (η) envolve uma comparação entre o desempenho real e o que seria obtido em um processo ideal relacionado e bem definido, VAN GOOL (1980).

Desta forma o relacionamento que existe entre irreversibilidade (geração de entropia) e a destruição de trabalho disponível passa a ser essencial, uma vez que as perdas podem ser medidas em unidades de entropia assim como em moedas correntes, tais como, Real (R\$) ou Dolar (US\$).

Com referência a sistemas abertos, a primeira e a segunda lei da termodinâmica são escritas como se segue,

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=0}^n \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum_e \dot{m}h^0 - \sum_s \dot{m}h^0 \quad 34$$

$$\dot{S}_{ger} = \frac{dS}{dt} - \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} - \sum_e \dot{m}s + \sum_s \dot{m}s \geq 0 \quad 35$$

Aglutinando-se as equações 34 e 35 e eliminando \dot{Q}_0 , encontra-se que a taxa de trabalho transferido \dot{W} depende explicitamente do grau de irreversibilidade termodinâmica do sistema, \dot{S}_{ger} , isto é,

$$\dot{W} = -\frac{d}{dt}(E - T_0 S) + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}(h^0 - T_0 s) - \sum_s \dot{m}(h^0 - T_0 s) - T_0 \dot{S}_{ger} \quad 36$$

Como, pela segunda lei, a taxa de geração de entropia, \dot{S}_{ger} , não pode ser negativa, os quatro primeiros termos do lado direito da equação 36 representam um limite superior para \dot{W} . É claro que tal limite é atingido, tão somente quando o sistema opera reversivelmente, isto é, quando $\dot{S}_{ger} = 0$. Logicamente pode-se, portanto, identificar tais termos como a taxa de trabalho transferido no limite de operação reversível, então;

$$\dot{W}_{rev} = -\frac{d}{dt}(E - T_0 s) + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}(h^0 - T_0 s) - \sum_s \dot{m}(h^0 - T_0 s) \quad 37$$

Em vista disso, a equação 36 pode ser reescrita da seguinte forma;

$$\dot{W} = \dot{W}_{rev} - T_0 \dot{S}_{ger} \quad 38$$

ou, utilizando-se, mais uma vez, da segunda lei, tem-se

$$\dot{W}_{rev} - \dot{W} = T_0 \dot{S}_{ger} \geq 0 \quad 39$$

Pode-se concluir, através da equação 39, que sempre que um sistema opera irreversivelmente, este destrói trabalho a uma taxa que é proporcional a taxa de geração de entropia do sistema. Este trabalho destruído, através da irreversibilidade

termodinâmica, $\dot{W}_{rev} - \dot{W}$, é denominado de trabalho disponível perdido, KESTIN (1978,1980). A proporcionalidade entre trabalho disponível perdido e geração de entropia ou entre suas respectivas taxas é, portanto

$$\dot{W}_{perdido} = T_0 \dot{S}_{ger} \quad 40$$

Algumas observações com respeito aos sinais de \dot{W} , \dot{W}_{rev} e $\dot{W}_{perdido}$ são necessárias, uma vez que existe uma diferença conceitual entre tais trabalhos. \dot{W} e seu valor limite, \dot{W}_{rev} , podem, ambos, ter valores positivos e negativos, dependendo do fato do sistema ter sido construído para produzir ou absorver trabalho. Por isso a desigualdade da segunda lei,

$$\dot{W}_{rev} \geq \dot{W} \quad 41$$

de outra maneira, $\dot{W}_{perdido}$, nunca pode ser negativo.

3.3.4 Geração de entropia

Finalmente, deduz-se, primeiramente, que a entropia gerada pelo sistema é uma medida do trabalho disponível que foi destruído e que, usando o limite reversível e a equação 37 é possível avaliar o limite superior da taxa de trabalho transferido do qual o sistema é capaz. A última dedução realizada traz uma questão pertinente: \dot{W}_{rev} (ou, para este estudo, \dot{W}) está ou não inteiramente disponível para consumo? A resposta depende em saber se o reservatório de pressão atmosférico P_0 é parte do ambiente e, ainda, se o sistema experimenta algum tipo de mudança no volume enquanto está se opondo ou é auxiliado por este reservatório de pressão, NEVERS & SEADER (1980). Nos casos onde P_0 troca trabalho com o sistema, a fração de \dot{W} que é transferida para a atmosfera é $P_0 \frac{dV}{dt}$, enquanto que o restante constitui a taxa de trabalho disponível, \dot{E}_w ,

$$\dot{E}_w = \dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt} \quad 42$$

ou

$$\begin{aligned} \dot{E}_W = & -\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S) + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \\ & + \sum_e \dot{m}(h^0 - T_0s) - \sum_s \dot{m}(h^0 - T_0s) - T_0 \dot{S}_{ger} \end{aligned} \quad 43$$

Na maioria dos sistemas de fluxo que são de interesse para a engenharia, o trabalho atmosférico $P_0 dV/dt$ está ausente e, portanto, \dot{E}_W é simplesmente igual a \dot{W} .

Consequentemente, no limite reversível, pode-se identificar um valor algébrico máximo para a taxa de trabalho disponível transferido:

$$\dot{E}_{W_{rev}} = \dot{W}_{rev} - P_0 \frac{dV}{dt} \quad 44$$

a qual pode ser avaliada, introduzindo-se a equação 37 na equação 44, a saber,

$$\dot{E}_{W_{rev}} = -\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S) + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}(h^0 - T_0s) - \sum_s \dot{m}(h^0 - T_0s) \quad 45$$

onde

$\dot{E}_{W_{rev}}$	= máxima potência mecânica útil entregue
$-\frac{d}{dt}(E + P_0V - T_0S)$	= acúmulo de exergia de não-fluxo
$\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i$	= exergia transferida via transferência de calor
$\sum_e \dot{m}(h^0 - T_0s)$	= fluxo exergetico de entrada, via fluxo de massa
$\sum_s \dot{m}(h^0 - T_0s)$	= fluxo exergetico de saída, via fluxo de massa

O objetivo de melhorar o desempenho termodinâmico de um sistema em engenharia, requer a identificação correta das características (ou componentes) mais responsáveis pela produção de entropia. Existe, segundo a literatura pertinente, um número básico destas características que são, extremamente, comuns em aplicações reais, BEJAN (1982).

A primeira é a transferência de calor através de uma diferença finita de temperatura diferente de zero.

Supondo-se dois sistemas a diferentes temperaturas T_H e T_L , experimentando uma interação finita de transferência de calor, Q . Observa-se ainda, que os dois sistemas não se comunicam entre si, diretamente, pois do contrário teriam uma fronteira comum e, então, T_H seria igual a T_L . Entre estes dois sistemas existe um terceiro sistema, comumente referido como “um intervalo de temperatura”. A transferência de calor Q entra e sai deste sistema intermediário sem experimentar nenhuma diminuição.

Aplicando-se a segunda lei da termodinâmica neste terceiro sistema é possível mostrar que a geração de entropia neste espaço é dada por:

$$S_{ger} = \frac{Q}{T_L} - \frac{Q}{T_H} = \frac{Q(T_H - T_L)}{T_L T_H} \geq 0 \quad 46$$

Nota-se, portanto, que a irreversibilidade associada a este componente é proporcional a diferença de temperatura e a transferência de calor que cruza o referido sistema e que, a perda de trabalho disponível resultante desta irreversibilidade é proporcional a geração de entropia. Usando, por exemplo, a formulação da disponibilidade, equação abaixo, tem-se que

$$\dot{W}_{max} = \dot{W} + \dot{W}_{p,0} = \sum_e \dot{m}(h - T_0 s) - \sum_s \dot{m}(h - T_0 s) + \sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad 47$$

e, pode-se mostrar que o trabalho perdido é igual a disponibilidade da interação de transferência de calor Q_{H,T_H} com respeito a T_L :

$$W_p = W_{max.} = Q \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) = T_L S_{ger} \quad 48$$

A segunda, igualmente, comum característica de irreversibilidade, é a presença de atrito de fluidos em dutos ou tubos.

Considerando, por exemplo, um fluxo constante e adiabático de uma substância pura, atravessando um pequeno segmento de duto e sabendo-se que as condições internas estão em P_i e T_i , enquanto que, indicado por experiências práticas, a pressão externa P_e , menor que a pressão interna por $P_e = P_i - \Delta P$. Pela primeira e segunda lei da termodinâmica, tem-se

$$h_i = h_e \quad 49$$

e

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m}(s_e - s_i) \quad 50$$

onde,

h_i = entalpia nas condições internas

h_e = entalpia nas condições externas

s_i = entropia nas condições internas

s_e = entropia nas condições externas.

Lembrando que para qualquer substância pura tem-se:

$$dh = Tds + v dP \quad \dots \dots \dots \quad 51$$

pode-se reescrever a taxa de geração de entropia como demonstrado abaixo

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m} \left(\int_{P_e}^{P_i} \frac{v}{T} dP \right)_{h=constante} \quad 52$$

Uma vez que v e T são ambos positivos, a taxa de geração de entropia é positiva, tão logo quanto o diferencial de pressão esteja entre P_i e P_e ($P_i > P_e$). Este fato é ainda mais visível quando se trata de limites especiais do comportamento de substâncias puras, conhecida como gás ideal (R, c_p), neste caso obtém-se

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m} R \ln \frac{P_i}{P_e} \approx \dot{m} R \frac{\Delta P}{P_i} \quad 53$$

para ($\Delta P \ll P_i$), onde R = constante universal do gás (8.314,43 J/kg.K); e em fluidos incompressíveis (c_p, ρ), tem-se a seguinte formulação:

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m} c_p \ln \frac{T_e}{T_i} \approx \dot{m} \frac{\Delta P}{\rho T_i} \quad 54$$

para ($\Delta P \ll \rho c_p T_i$).

A relação entre a geração de entropia e o trabalho disponível perdido é fácil de ser visto no caso de atrito em fluidos num duto ou tubo, uma vez que se tem que investir trabalho útil para puxar ou empurrar o fluido através da tubulação. A potência disponível perdida, pode, então, ser calculada com base na disponibilidade,

$$\dot{W}_p = \dot{m} \left[(h - T_0 s)_i - (h - T_0 s)_e \right] = T_0 \dot{S}_{ger} \quad 55$$

A disponibilidade de fluxo decresce ao longo da tubulação e, este decréscimo é proporcional ao diferencial de pressão por unidade de comprimento (ΔP) e a taxa de fluxo \dot{m} .

Uma outra característica comum de irreversibilidade é a mistura de dois fluxos de fluidos não similares. Tais fluxos podem diferir com respeito ao estado termodinâmico, por exemplo, duas correntes de ar na mesma pressão, mas com temperaturas diferentes ou com respeito a composição química.

Considerando uma mistura adiabática de duas correntes \dot{m}_1 e \dot{m}_2 transportando a mesma substância, num estado constante, a primeira e a segunda leis da termodinâmica podem ser escritas como:

$$xh_1 + (1-x)h_2 = h_3 \quad 56$$

e

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m}s_3 - x\dot{m}s_1 - (1-x)\dot{m}s_2 \quad 57$$

onde, considerando-se para fins de conservação de massa, as seguintes expressões

$$x = \dot{m}_1 / (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \quad 58$$

e

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad 59$$

Se a substância puder ser considerada um gás ideal (c_p) e se o processo de mistura ocorre a pressão constante ($P_1 = P_2 = P_3$), então as equações 56 e 57 podem ser escritas de uma forma mais objetiva, tal como se segue,

$$xT_1 + (1-x)T_2 = T_3 \quad 60$$

e

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}c_p} = x \ln \frac{T_3}{T_1} + (1-x) \ln \frac{T_3}{T_2} \quad 61$$

Eliminando-se T_3 entre as expressões acima, obtém-se

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}c_p} = \ln \frac{x + \tau(1-x)}{\tau^{(1-x)}} \quad 62$$

onde

τ = é a razão de temperatura entre T_2 e T_1 , isto é;

$$\tau = T_2 / T_1 \quad 63$$

Pode-se observar que, tão logo haja diferença entre as temperaturas das duas correntes T_1 e T_2 , isto é, $\tau \neq 1$, ocorrerá a produção de entropia através do processo de mistura.

A variação de $\dot{S}_{ger} / \dot{m}c_p$ com a razão da taxa de fluxo (x) indica que quando a taxa de temperatura τ é fixa, existe um x crítico para o qual \dot{S}_{ger} é um valor

máximo. Este valor crítico de x é obtido através da equação 62, fazendo-se $\partial \dot{S}_{ger} / \partial x = 0$ e obtém-se a seguinte expressão:

$$x = \frac{\tau - 1 - \tau \ln \tau}{(1 - \tau) \ln \tau} \quad 64$$

Pode-se ainda, dizer que a geração de entropia tem, exatamente, a mesma forma da equação 62 para o caso de fluidos incompressíveis. Só que nesta situação c_p é substituído por c , o calor específico do fluido incompressível. Deve-se, todavia, lembrar que a equação 62 é específica, pois foi desenvolvida baseando-se no modelamento de um processo de mistura de duas correntes em condições adiabáticas e a pressão constante.

Em adição as irreversibilidades provocadas pela transferência de calor, atrito em fluidos e misturas, existem outras condições onde ocorrem irreversibilidades na operação de um sistema ou equipamento, tais como carga e descarga, compressão e expansão e, combustão.

Viu-se, anteriormente, que o fenômeno de transferência de calor está, sempre, acompanhado por geração de entropia, conseqüentemente, pela destruição de trabalho disponível.

Sabendo-se que a taxa líquida de transferência de calor (Q) entre duas superfícies, com temperaturas T_1 e T_2 , é dada por:

$$Q = \bar{h}A(T_1 - T_2) \quad 65$$

onde

\bar{h} = coeficiente de transferência de calor

A = área da seção.

No caso de problemas de isolamento térmico, o objetivo é minimizar a condutância térmica efetiva $\bar{h}A$. Neste caso as duas temperaturas T_1 e T_2 são fixas, então assim como $\bar{h}A$ decresce, o mesmo ocorre com a taxa líquida de transferência de calor entre as duas superfícies e, portanto, a taxa de geração de entropia também decresce quando a condutância térmica decresce, EVANS (1980).

BEJAN (1979) considerou um ponto (x, y) num fluido que experimenta uma transferência de calor convectiva e estimou a taxa de geração de entropia por unidade de

volume \dot{S}_{ger}''' [W/m³ K], através de todo um desenvolvimento matemático e escreveu a segunda lei da termodinâmica para dx dy num sistema aberto da seguinte forma:

$$\dot{S}_{ger}''' = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 + \frac{\mu}{T} \Phi \quad 66$$

Na mesma publicação define esta geração de entropia para sistemas de eixos cartesianos bi e tri-dimensionais, assim como para sistemas de coordenadas cilíndricas e esféricas.

Uma outra observação, diz respeito a ordem de grandeza do termo de viscosidade relativo ao termo de transferência de calor na equação de \dot{S}_{ger}''' . Em um grande número de casos de transferência de calor por convecção o termo de dissipação viscosa $\mu\Phi$ é desprezado na equação da primeira lei da termodinâmica. Se, em problemas reais, as dimensões características para os gradientes de velocidade e temperatura são v^*/L^* e $\Delta T^*/L^*$, respectivamente, então a ordem de grandeza do termo $\mu\Phi$ relacionado ao termo de condução $k\nabla \cdot (\nabla T)$ na equação de energia é:

$$\left(\frac{\text{atrito no fluido}}{\text{transferência de calor}} \right)_{1^a \text{ lei}} \approx \frac{\mu(v^*)^2}{k\Delta T^*} \quad 67$$

De outra maneira, a grandeza da irreversibilidade do atrito no fluido relativo a irreversibilidade da transferência de calor é:

$$\left(\frac{\text{atrito no fluido}}{\text{transferência de calor}} \right)_{2^a \text{ lei}} \approx \frac{T^*}{\Delta T^*} \frac{\mu(v^*)^2}{k\Delta T^*} \quad 68$$

Parece claro, agora, que embora o termo $\frac{\mu(v^*)^2}{k\Delta T^*}$ possa ser muito menor que a unidade, em muitas aplicações, o termo devido a irreversibilidade do atrito no fluido não é, necessariamente, desprezível. Nota-se, ainda, que a grandeza do termo da viscosidade depende, também, da razão entre a temperatura absoluta característica e o diferencial de temperatura característica, $T^*/\Delta T^*$. Em muitos casos de transferência de calor esta razão é muito maior que 1.

Observa-se, acima, dois parâmetros adimensionais: razão de diferencial de temperatura(σ),

$$\sigma = \frac{\Delta T}{T} \quad 69$$

e a razão de distribuição de irreversibilidade (Ψ),

$$\Psi = \frac{\dot{S}_{ger}'''(\text{atrito no fluido})}{\dot{S}_{ger}'''(\text{transferência de calor})} \quad 70$$

onde a expressão de geração de entropia, tem a forma básica de

$$\dot{S}_{ger}''' = \dot{S}_{ger}'''(\text{transferência de calor}) + \dot{S}_{ger}'''(\text{atrito no fluido}) \quad 70'$$

Segundo BEJAN (1980) no caso de um fluxo através de um duto liso circular de raio r_0 com fluxo uniforme de calor q'' [W/m²] na parede, num regime totalmente desenvolvido, a velocidade e a temperatura são dados por

$$v_x = v_{x,max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad 71$$

e

$$T - T_{eo} = \frac{q'' r_0}{k} \left[-4 \frac{x}{x_0} - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_0} \right)^4 \right] \quad 72$$

onde T_0 é, neste caso, a temperatura absoluta localizada no ponto de origem do eixo do tubo ou duto.

A taxa volumétrica de geração de entropia, nas coordenadas cilíndricas, reduz-se a:

$$\dot{S}_{ger}''' = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{T} \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} \right)^2 \quad 73$$

Combinando esta equação com as equações de v_x e T , fornecidas anteriormente, chega-se a:

$$\dot{S}_{ger}''' \frac{kT_{eo}^2}{q''^2} = (2R - R^3)^2 + \frac{16}{Pe^2} + \varphi R^2 \quad 74$$

$$\text{onde } Pe = \text{número de Peclet} = \frac{r_0 v_{x,max.}}{\alpha} = \frac{x_0}{r_0} \quad 75$$

e, também, que

$$R = r/r_0 \quad 76$$

e

$$\varphi = 4\mu k T_{eo} \left(\frac{v_x}{r_0 q''} \right)^2 \quad 77$$

Na derivação da equação 74 é assumido que a diferença da temperatura local $T - T_{eo}$ é, consideravelmente, menor que a temperatura absoluta local. Da mesma forma que, ainda, na equação 74 o primeiro termo representa a entropia gerada pela transferência de calor na direção radial, o segundo termo leva em consideração a condução axial e, o último termo é a contribuição do atrito no fluido.

A taxa de geração de entropia em fluxos internos a um duto de geometria arbitrária com transferência de calor nas paredes pode ser deduzida da seguinte maneira.

Considerando um fluxo passando numa seção transversal A e perímetro molhado p_m , tem-se que as propriedades principais da corrente \dot{m} são T , P , h , s e ρ . Geralmente, esta situação de transferência de calor é caracterizada por um gradiente finito de pressão devido ao atrito – $dP/dx > 0$ e, por uma transferência de calor para a corrente do fluido a uma taxa q' [W/m], através de diferença finita de temperatura do fluido

(ΔT). Focando-se num pedaço do duto, dx , como se fosse o sistema, a taxa de geração de entropia, dada pela segunda lei, é:

$$d\dot{S}_{ger} = \dot{m}ds - \frac{q'dx}{T + \Delta T} \quad 78$$

Aplicando-se a primeira lei para o mesmo sistema, tem-se que

$$\dot{m}dh = q'dx \quad 79$$

Para qualquer substância pura, pode-se escrever a relação canônica, como sendo:

$$\frac{dh}{dx} = T \frac{ds}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \quad 80$$

Substituindo-se ds dado na equação 78 e dh dado pela equação 79 na expressão acima, obtém-se a taxa de geração de entropia por unidade de comprimento do duto:

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{q'\Delta T}{T^2(1+\sigma)} + \frac{\dot{m}}{\rho T} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad 81$$

onde,

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{d\dot{S}_{ger}}{dx} \quad 82$$

Em aplicações onde o parâmetro σ é desprezível, quando comparado a unidade, tem-se uma forma simplificada da equação 81, isto é:

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{q'\Delta T}{T^2} + \frac{\dot{m}}{\rho T} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad 83$$

Lembrando-se que o número de Stanton (St) pode representar a relação entre a taxa de transferência de calor q' e a diferença de temperatura entre o fluido e a parede do duto, tem-se:

$$St = \frac{q'}{c_p G (p_m \Delta T)} \quad 84$$

onde $G =$ é a velocidade mássica expressa por

$$G = \dot{m}/A \quad 85$$

Observa-se que o termo $q'/(p_m \Delta T)$ é o coeficiente médio de transferência de calor.

Para a maioria das geometrias de dutos, o número de Stanton depende do número de Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{D_h G}{\mu} \quad 86$$

e de outros parâmetros que descrevam o fluido e a geometria específica do duto e, que o número de Reynolds depende do diâmetro (D) para dutos circulares ou do diâmetro hidráulico (D_h) para dutos não circulares, onde (D_h) é definido como:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P_m} \quad 87$$

sendo

$A =$ área da seção transversal ao fluxo

$P_m =$ perímetro molhado do duto

As características do atrito no fluido em certos dutos são, geralmente, descritas na forma de correlações denominadas fator ou coeficiente de atrito (f), onde

$$f = \frac{\rho D_h}{2G^2} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad 88$$

e novamente, o fator de atrito, também, depende do número de Reynolds e de mais alguns parâmetros geométricos do duto e de sua superfície. O que leva a taxa de geração de entropia por unidade de comprimento de duto ao seguinte resultado:

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{q'^2}{4T^2 \dot{m} c_p} \frac{D_h}{St} + \frac{2\dot{m}^3}{\rho^2 T} \frac{f}{D_h A^2} \quad 89$$

Num duto circular, \dot{S}'_{ger} assume a forma de

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{q'^2}{\pi T^2 k Nu((Re)_D, Pr)} + \frac{32\dot{m}^3}{\pi^2 \rho^2 T} \frac{f((Re)_D)}{D^5} \quad 90$$

onde, na expressão acima, o número de Reynolds, baseado em D, é dado por:

$$(Re)_D = \frac{4\dot{m}}{\pi \mu D} \quad 91$$

e o número de Nusselt (Nu), é dado por:

$$Nu = St(Re)_D Pr \quad 92$$

Nota-se que, diferente da fórmula geral, equação 89, que depende de dois parâmetros (A e p_m), a equação para dutos circulares depende somente de um parâmetro geométrico [D ou $(Re)_D$].

Observa-se, ainda, que a medida que o diâmetro aumenta, $(Re)_D$ diminui e, o interessante efeito na geração de entropia \dot{S}'_{ger} é que enquanto a contribuição da transferência de calor aumenta, o termo do atrito devido ao fluido diminui. Este é um exemplo no qual uma variação num parâmetro geométrico sempre tem um efeito oposto

nos dois termos de \dot{S}'_{ger} . Conseqüentemente, é possível determinar o diâmetro ótimo do tubo ou duto e um número de Reynolds $((Re)_D)$, que resulte numa irreversibilidade mínima.

Se o fluxo no tubo é turbulento e totalmente desenvolvido o número de Nusselt e o fator de atrito são fornecidos pelas seguintes expressões:

$$Nu = 0,023[(Re)_D]^{0,8} (Pr)^{0,4} \quad 93$$

e

$$f = 0,046[(Re)_D]^{-0,2} \quad 94$$

Combinando estas expressões com a equação geral e fazendo $\frac{\partial \dot{S}'_{ger}}{\partial (Re)_D} = 0$, tem-se

$$(Re)_{D,otimo} = 2,023(Pr)^{-0,071} (B_0)^{0,358} \quad 95$$

onde, B_0 é um parâmetro adimensional, fixado tão logo seja especificado q' , \dot{m} e o fluido de trabalho, pois

$$B_0 = \frac{\rho \dot{m} q'}{\mu^{2,5} (kT)^{0,5}} \quad 96$$

Como conclusão, pode-se observar que o número de Reynolds aumenta com o produto $(\dot{m} * q')$ e isto significa que o diâmetro D ótimo do tubo decresce, constantemente, com o aumento de B_0 .

Finalmente, pode-se substituir o resultado da equação 95 na equação geral, a fim de se calcular a taxa de geração de entropia mínima, $(\dot{S}'_{ger})_{minima}$, isto é:

$$\frac{\dot{S}'_{ger}}{\dot{S}'_{ger,minima}} = 0,856 \left[\frac{(Re)_D}{(Re)_{D,otimo}} \right]^{-0,8} + 0,144 \left[\frac{(Re)_D}{(Re)_{D,otimo}} \right]^{4,8} \quad 97$$

Um resultado interessante da expressão acima é o tamanho relativo de $\dot{S}'_{ger}((Re)_D)$ com respeito ao mínimo $\dot{S}'_{ger}((Re)_{D,otimo})$. Observa-se, ainda, que a taxa de geração de entropia cresce rapidamente nos dois lados do ponto ótimo e que a razão de distribuição de irreversibilidade segue ao longo de uma curva em forma de "V". Quando $\dot{S}'_{ger} = \dot{S}'_{ger,minima}$, tem-se que $\varphi = 0,144/0,856 = 0,168$.

Considerando, agora, o efeito do isolamento na irreversibilidade de um sistema onde a geometria (A, L) e o material (k) são fixos, tem-se

$$Q_0 = \frac{kA}{L} (T_H - T_L) \quad 98$$

e a taxa de geração de entropia com esta transferência de calor é dada por:

$$\dot{S}'_{ger,0} = Q_0 \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) \quad 99$$

sendo que ambos, Q_0 e $\dot{S}'_{ger,0}$, são fixos, uma vez que A, L, k, T_H e T_L já estão especificados e não variam através do isolamento.

Quando o objetivo é reduzir a taxa de geração de entropia abaixo do valor calculado pela equação 99, tem-se, então, que a taxa líquida de geração de entropia no isolamento pode ser calculada como sendo:

$$\dot{S}'_{ger} = \frac{Q_L}{T_L} + \frac{Q_H - Q_L}{T_m} - \frac{Q_H}{T_H} = Q_L \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_m} \right) + Q_H \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_H} \right) \quad 100$$

onde

$$Q_H = \frac{kA}{L/2} (T_H - T_m) \quad 101$$

e

$$Q_L = \frac{kA}{L/2} (T_m - T_L) \quad 102$$

Combinando estas relações, obtém-se \dot{S}_{ger} como uma função de T_m somente e, minimizando esta função, encontra-se

$$T_{m,otimo} = \sqrt{T_H T_L} \quad 103$$

que substituída na equação 100 leva a:

$$\dot{S}'_{ger,minima} = 4 \left(\sqrt[4]{\frac{T_H}{T_L}} - \sqrt[4]{\frac{T_L}{T_H}} \right)^2 \frac{kA}{L} \quad 104$$

A temperatura ótima do ponto médio é igual a média geométrica das temperaturas finais, uma vez que $\sqrt{T_L T_H}$ é menor que a média aritmética $(T_L + T_H)/2$, ocorrendo quando o efeito do resfriamento não está presente, conclui-se que, a geração de entropia mínima ocorre quando o isolamento é resfriado neste ponto médio.

A redução máxima em \dot{S}_{ger} , associada com o efeito de resfriamento no ponto médio ótimo, pode ser analisada dividindo-se as equações 104 e 99, lado a lado. Com isto, obtém-se o número de geração de entropia (N_s), através de:

$$N_s = \frac{\dot{S}_{ger,minima}}{\dot{S}_{ger,0}} \quad (\langle 1 \rangle) \quad 105$$

que depende somente da razão entre as temperaturas absolutas (T_H / T_L), então

$$N_s = 4 \frac{\sqrt{T_H/T_L}}{\left(\sqrt{T_H/T_L} + 1\right)^2} \quad 106$$

Em função do exposto anteriormente é possível, agora, definir eficiências baseadas na combinação das 1ª e 2ª leis da Termodinâmica, a fim de se avaliar sistemas e processos de interesse na Engenharia Agrícola.

Para isso, pode-se definir dois tipos de eficiências exergéticas (η), uma denominada tradicional (η_T) e outra baseada nos desenvolvimentos realizados por KOTAS (1985), denominada eficiência racional (η_K).

Tem-se, portanto, as seguintes expressões

$$\eta_T = \frac{Ex_{produzida}}{Ex_{fornecida}} \quad 107$$

onde

$$Ex_{produzida} = Ex_{fornecida} - Ex_{destruída} - Ex_{perdida}$$

e

$$\eta_K = \frac{\sum \Delta \dot{E}x_s}{\sum \Delta \dot{E}x_e} = 1 - \frac{\dot{i}}{\sum \Delta \dot{E}x_e} \quad 108$$

onde

$$\sum \Delta \dot{E}x_s = \text{somatório das transferências de exergia deixando o sistema}$$

$$\sum \Delta \dot{E}x_e = \text{somatório das transferências de exergia entrando no sistema}$$

\dot{I} = irreversibilidades internas na região de controle.

Este aspecto de razão entre duas quantidades, faz a equação 108 ser, particularmente, adequada para servir como um critério do grau termodinâmico de perfeição de um processo. Logo, a diferença $1 - \eta_K$, é, claramente, a fração de transferência de exergia de entrada que é perdida através das irreversibilidades internas do processo e, é comumente denominada de “imperfeição da eficiência racional”, segundo KOTAS (1980 a e b).

3.4 DEFINIÇÃO E CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS

Sabendo-se que a psicrometria trata da determinação das propriedades termodinâmicas do ar úmido e a utilização destas propriedades na análise de condições e processos envolvendo ar úmido e, portanto, objeto importante deste trabalho; define-se, a seguir, as equações e as propriedades para a determinação das condições do ar úmido.

O ar atmosférico contém um grande número de constituintes gasosos, assim como vapor de água e diversos contaminantes. Por definição, ar seco existe, quando todo vapor de água e contaminantes foram removidos do ar atmosférico. O peso molecular do ar seco é igual a 28,9645 e, portanto, a constante do gás – ar seco – é determinada por:

$$R_a = \frac{R}{M_a} = \frac{8.314,34}{28,9645} = 287,0686 \quad J/kg.K \quad 109$$

onde

R = constante universal dos gases = 8.314,34 J / kg . K

M_a = peso molecular do ar seco = 28,9645 kmol

R_a = constante do gás (ar seco) , J / kg . K

Como o ar úmido, por definição, é uma mistura binária de ar seco e vapor de água, a quantidade de vapor de água no ar úmido varia de zero (ar seco) até um máximo que depende da temperatura e da pressão. Este valor limite superior refere-se a saturação, um estado de equilíbrio neutro entre o ar úmido e a fase de água condensada (sólida ou líquida). O peso molecular da água é 18,01534 e a constante do gás – vapor de água – é dada por :

$$R_{H_2O} = \frac{R}{M_{H_2O}} = \frac{8.314,34}{18,01534} = 461,52 \quad J/kg.K \quad 110$$

As propriedades termodinâmicas da água, na saturação, são necessárias para se determinar um número razoável de propriedades do ar úmido, principalmente, na determinação da umidade absoluta de saturação, a pressão de vapor de água de saturação é requerida.

Valores, tanto do ar quanto da água, podem ser obtidos através de tabelas e gráficos, que se encontram nas referências ou serem determinados através das equações abaixo, segundo ASHRAE - FUNDAMENTALS (1981) e ASAE - STANDARDS (1986).

A pressão de saturação do gelo e da água líquida podem ser calculadas, utilizando-se as seguintes equações:

$$\ln(p_{H_2O,s}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln T$$

111

onde

$$\begin{array}{ll} 173,15 \leq T \text{ (K)} \leq 273,15 & C_1 = -5674,53590 * 10^0 \\ C_2 = 6,39252470 * 10^0 & C_3 = -0,96778430 * 10^{-2} \\ C_4 = 0,62215701 * 10^{-6} & C_5 = 0,20747825 * 10^{-8} \\ C_6 = -0,94840240 * 10^{-12} & C_7 = 4,16350190 * 10^0 \end{array}$$

e

$$\ln(p_{H_2O,s}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T$$

112

onde

$$\begin{array}{ll} 273,15 \leq T \text{ (K)} \leq 473,15 & C_8 = -5800,22060 * 10^0 \\ C_9 = 1,39149930 * 10^0 & C_{10} = -0,04860239 * 10^0 \\ C_{11} = 0,41764768 * 10^{-4} & C_{12} = -0,14452093 * 10^{-7} \\ C_{13} = 6,54596730 * 10^0 & T = \text{temperatura absoluta, K} \\ p_{H_2O,s} = \text{pressão de saturação da H}_2\text{O, Pa} & \ln = \text{logaritmo neperiano} \end{array}$$

Já para a ASAE, duas equações para a pressão de saturação como função da temperatura absoluta e uma equação da temperatura, na linha de saturação, como função da pressão de saturação, são definidas a seguir:

$$\ln(p_{H_2O,s}) = 31,9602 - \frac{6270,3605}{T} - 0,46057 \ln T \quad 113$$

onde

$$255,38 \leq T \text{ (K)} \leq 273,16 \dots\dots\dots$$

e

$$\ln\left(\frac{p_{H_2O,s}}{R}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \quad 114$$

onde

$$273,16 \leq T \text{ (K)} \leq 533,16$$

$$R = 22.105.649,25$$

$$A = -27.405,526 * 10^0$$

$$B = 97,5413000 * 10^0$$

$$C = -0,1462440 * 10^0$$

$$D = 0,125580 * 10^{-3}$$

$$E = -0,485020 * 10^{-7}$$

$$F = 4,349030 * 10^0$$

$$G = 0,393810 * 10^{-2}$$

e

$$T - 255,38 = \sum_{i=0}^8 A_i \left[\ln(0,00145 p_{H_2O,s}) \right]^i \quad 115$$

onde

$$620,52 < p_{H_2O,s} \text{ (Pa)} < 4.688.396,0$$

$$A_0 = 19,53220$$

$$A_1 = 13,66260$$

$$A_2 = 1,176780$$

$$A_3 = -0,189693$$

$$A_4 = 0,08745300 * 10^0$$

$$A_5 = -0,01740530 * 10^0$$

$$A_6 = 0,00214768 * 10^0$$

$$A_7 = -0,13834300 * 10^{-3}$$

$$A_8 = 0,38000000 * 10^{-5}$$

A umidade absoluta (W) de uma dada amostra de ar úmido é definida como a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco contida na amostra, isto é,

$$W = \frac{m_{H_2O,v}}{m_a} \quad 116$$

onde

$W =$ umidade absoluta, kg_v / kg_a

$m_{H_2O,v} =$ massa de vapor de água, kg_v

$m_a =$ massa de ar seco, kg_a .

Fração molar (x) de um dado componente na mistura é igual ao número de moles (n_i) daquele componente dividido pelo número total de moles (n) de todos os componentes na mistura. A fração molar para o ar seco é x_a ; para o vapor de água $x_{H_2O,v}$, e para o vapor de água na saturação, $x_{H_2O,s}$. Por definição, $x_a + x_{H_2O,v} = 1$. Também, a umidade absoluta é igual a razão entre as frações molares do vapor de água e do ar seco, multiplicado pela razão entre os pesos moleculares da água e do ar seco, isto é:

$$W = \frac{M_{H_2O}}{M_a} \frac{x_{H_2O,v}}{x_a} = \frac{18,01534}{28,9645} \frac{x_{H_2O,v}}{x_a} = 0,62198 \frac{x_{H_2O,v}}{x_a} \quad 117$$

A densidade (ρ) do ar úmido é a razão entre a massa total da mistura e o volume total da mistura, então;

$$\rho = \frac{(m_a + m_{H_2O,v})}{V} \quad 118$$

As definições e equações seguintes estão relacionadas com parâmetros de umidade em ar úmido saturado:

Umidade de Saturação (W_s) é a razão de umidade de mistura do ar úmido saturado com respeito a água (ou gelo) na mesma temperatura e pressão.

Grau de saturação (ζ) é a razão entre a umidade absoluta (W) e a umidade absoluta de saturação (W_s) na mesma temperatura e pressão.

$$\zeta = \frac{W}{W_s} \Big|_{t,p} \quad 119$$

Umidade relativa (ϕ) é a razão entre a fração molar do vapor de água ($x_{H_2O,v}$) numa dada amostra de ar úmido e a fração molar do vapor de água saturado da mesma amostra de ar úmido, na mesma temperatura e pressão:

$$\phi = \frac{x_{H_2O,v}}{x_{H_2O,s}} \Big|_{t,p} \quad 120$$

Combinando as equações 9, 11 e 12, obtém-se:

$$\phi = \frac{\zeta}{1 - (1 - \zeta)x_{H_2O,s}} \quad 121$$

Temperatura de ponto de orvalho (t_{po}) é a temperatura do ar úmido saturado na mesma pressão, com a mesma umidade absoluta (W) da mesma dada amostra de ar úmido. É definida como a solução $t_{po}(p, W)$ da equação;

$$W_s(p, t_{po}) = W \quad 122$$

Temperatura termodinâmica de bulbo úmido (t^*) é a temperatura na qual a água (líquida ou sólida), por evaporação no ar úmido a uma dada temperatura de bulbo seco (t_{bs}) e umidade absoluta (W), pode trazer o ar até a saturação, adiabaticamente, na mesma temperatura (t^*), enquanto a pressão (p) é mantida constante.

Quando ar úmido é considerado uma mistura independente de dois gases perfeitos, ar seco e vapor de água, que obedece cada um a equação de estado para gases perfeitos, então:

$$p_a V = n_a RT \quad (\text{ar seco}) \quad 123$$

e

$$p_{H_2O,v}V = n_{H_2O,v}RT \text{ (vapor de água)} \quad 124$$

onde

p_a = pressão parcial do ar seco

$p_{H_2O,v}$ = pressão parcial do vapor de água

V = volume total da mistura

n_a = número de moles de ar seco

$n_{H_2O,v}$ = número de moles do vapor de água

R = constante universal dos gases = 8.314,34 J / kmol.K

T = temperatura absoluta, K

Observa-se, então, que a mistura também obedece a equação dos gases perfeitos, isto é:

$$pV = nRT \quad 125$$

ou

$$(p_a + p_{H_2O,v})V = (n_a + n_{H_2O,v})RT \quad 126$$

onde

$p = p_a + p_{H_2O,v}$ = pressão total da mistura

$n = n_a + n_{H_2O,v}$ = número de moles totais da mistura

Das equações 117 a 121, as frações molares do ar seco e do vapor de água são definidas, respectivamente, como se segue:

$$x_a = \frac{p_a}{(p_a + p_{H_2O,v})} \quad 127$$

e

$$x_{H_2O,v} = \frac{P_{H_2O,v}}{(p_a + P_{H_2O,v})} = \frac{P_{H_2O,v}}{p} \quad 128$$

Então, das equações 117, 127 e 128, a umidade absoluta (W) é dada por:

$$W = 0,62198 \frac{P_{H_2O,v}}{p - P_{H_2O,v}} \quad 129$$

e usando-se a definição de grau de saturação (ζ), dada pela equação 119, pode-se escrever a umidade absoluta de saturação (W_s) da seguinte forma:

$$W_s = 0,62198 \frac{P_{H_2O,s}}{p - P_{H_2O,s}} \quad 130$$

Uma relação exata para calcular W_s introduz um fator de correção (f_s) que leva, em consideração, os seguintes efeitos: (1) efeito de gases dissolvidos nas propriedades da fase condensada; (2) efeito da pressão nas propriedades da fase condensada e; (3) efeito da força intermolecular nas propriedades da própria umidade. Os valores de (f_s) podem ser encontrados em tabela da ASHRAE-Fundamentals. Portanto, a equação 130 transforma-se em:

$$W_s = 0,62198 \frac{f_s * P_{H_2O,s}}{(p - f_s * P_{H_2O,s})} \quad 131$$

O termo, $p_{H_2O,s}$, representa a pressão de saturação do vapor de água na temperatura t . Esta pressão, $p_{H_2O,s}$, é uma função, somente, da temperatura e difere, ligeiramente, da pressão de vapor de água no ar úmido saturado, p_s . Esta última, sim, uma função da temperatura e pressão da mistura e, definida pela seguinte relação:

$$p_s = x_{H_2O,s} p \quad 132$$

Sabendo-se que a umidade relativa é definida pela equação 120 e substituindo a equação 128 para x_{H_2O} e $x_{H_2O,s}$, tem-se

$$\phi = \frac{x_{H_2O}}{x_{H_2O,s}} \Big|_{t,p} \quad 133$$

e substituindo equação 127 para $x_{H_2O,s}$ na equação 121 obtém-se, finalmente,

$$\phi = \frac{\zeta}{1 - (1 - \zeta) \left(\frac{p_{H_2O,s}}{p} \right)} \quad 134$$

Da mesma maneira que para W_s , existe uma relação exata para calcular ϕ , utilizando-se do mesmo fator f_s e, portanto, a equação 134 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\phi = \frac{\zeta}{1 - \left[(1 - \zeta) \left(\frac{f_s * p_{H_2O,s}}{p} \right) \right]} \quad 135$$

Ambos, ζ e ϕ , são zero para ar seco e 1 (um) para ar úmido saturado.

O volume específico (v) da mistura de ar úmido é expresso em termos da massa unitária de ar seco, isto é:

$$v = \frac{V}{m_a} = \frac{V}{28,9645 * n_a} \quad 136$$

onde

V = volume total da mistura

m_a = massa total de ar seco

n_a = número de moles de ar seco

Pelas equações 123 e 136, com a relação $p = p_a + p_{H_2O}$, chega-se a seguinte expressão:

$$v = \frac{R_a T}{p - p_{H_2O}} \quad 137$$

e, utilizando-se, agora, a equação 129, obtém-se o seguinte resultado,

$$v = \frac{R_a T}{p} (1 + 1,6078W) \quad 138$$

onde

v = volume específico do ar, m^3 / kg_a

T = temperatura absoluta do ar, K

p = pressão total do ar, Pa

p_{H_2O} = pressão parcial do vapor de água, Pa

W = umidade absoluta do ar, kg_v / kg_a .

A entalpia da mistura de gases perfeitos é igual a soma das entalpias parciais individuais dos componentes. Portanto, a entalpia do ar úmido pode ser escrita como sendo:

$$h = h_a + Wh_s \quad 139$$

sendo,

$$h_a = c_{p_a} t \quad 140$$

e

$$h_s = h_{s,0} + c_{p_v} t \quad 141$$

ou quando trata-se de processo adiabático, utilizando-se a temperatura termodinâmica de bulbo úmido (t^*), tem-se que a equação 141 é rearranjada para:

$$h_s^* = h_{s,0} + c_{p,v} t^* \quad 142$$

onde

h = entalpia da mistura de ar úmido, kJ / kg_a

h_a = entalpia específica do ar seco, kJ / kg_a

h_s = entalpia do vapor de água saturado, na temperatura t , kJ / kg_v

h_s^* = entalpia do vapor de água saturado, na temperatura t^* , kJ/kg_v

c_{pa} = calor específico do ar seco, kJ / kg_a . °C

c_{pv} = calor específico do vapor de água, kJ / kg_v . °C

$h_{s,0}$ = entalpia do vapor de água saturado a $t = 0$ °C, = 2.501,3 kJ / kg_v

t = temperatura de bulbo seco do ar, °C

t^* = temperatura termodinâmica de bulbo úmido, °C;

então, a equação 139 torna-se igual a :

$$h = c_{pa} * t + W(2501,3 + c_{pv} * t) \quad 143$$

Como citado anteriormente, para qualquer estado do ar úmido, existe uma temperatura termodinâmica de bulbo úmido (t^*) na qual a água (líquida ou sólida) pode ser evaporada no ar, para trazê-lo até a saturação na mesma temperatura e pressão. Portanto, se o processo é estritamente adiabático, a conservação de entalpia, a pressão constante, requer que:

$$h + (W_s^* - W)h_{H_2O}^* = h_s^* \quad 144$$

onde as propriedades (W_s^* , $h_{H_2O}^*$, h_s^*) são funções unicamente da temperatura t^* , para um valor fixo de pressão. A equação 144 é, portanto, exata, pois define a temperatura termodinâmica de bulbo úmido. A equação acima pode ser alterada através do uso das relações de Dalton, segundo THRELKELD (1970) utilizando-se das equações 141, 142 e 143 e da relação aproximada para $h_{H_2O,ls}^*$, que vem da relação dada por :

$$h_{H_2O,l} = h_{H_2O,ls} + v_{H_2O,ls} (P - P_{H_2O,v}) \approx c_{pl} (T - 273,15) \cong c_{pl} * t \quad 145$$

resultando em:

$$h_{H_2O,ls}^* = c_{pvls} * t^* \quad 145'$$

onde

$h_{H_2O,l}$ = entalpia da água líquida, na temperatura (t), adicionada ao ar, kJ/kg

$h_{H_2O,ls}^*$ = entalpia da água líquida saturada, na temperatura (t^*), adicionada ao ar, kJ/kg

c_{pl} = calor específico da água líquida, kJ/kgK ou kJ/kg. $^{\circ}$ C

c_{pvls} = calor específico da água (líquido saturado), kJ/kg.K ou kJ/kg. $^{\circ}$ C

$t^* \approx t_{bu}$ = temperatura termodinâmica de bulbo úmido \approx temperatura de bulbo úmido, $^{\circ}$ C

t = temperatura de bulbo seco, $^{\circ}$ C.

que introduzida na equação 144 e resolvendo para a umidade absoluta, obtém-se:

$$W = \frac{W_s (h_s^* - h_{H_2O}^*) - c_{pa} (t - t^*)}{h_s - h_{H_2O}^*} \quad 146$$

a qual se transforma em:

$$W = \frac{W_s (2501,3 + c_{pv} * t^* - c_{pvls} * t^*) - c_{pa} (t - t^*)}{2501,3 + c_{pv} * t - c_{pvls} * t^*} \quad 146'$$

Segundo McQUISTON & PARKER (1982) na equação acima t representa a temperatura de bulbo seco do ar e t^* a temperatura termodinâmica de bulbo úmido do ar, que pode ser aproximada pela temperatura de bulbo úmido de um psicrômetro ou de um instrumental similar; embora sabendo que a combinação do processo de transferência de calor e massa do termômetro de bulbo úmido não seja o mesmo que do processo de saturação adiabática, o qual está relacionado com a temperatura termodinâmica de bulbo úmido; entretanto o erro é relativamente pequeno quando o termômetro de bulbo úmido é

usado sob condições adequadas. Neste caso a diferença entre a temperatura de bulbo úmido e a temperatura termodinâmica de bulbo úmido é menor que $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, quando a pressão é próxima da pressão atmosférica padrão, a temperatura de bulbo seco está acima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a diferença entre a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar é inferior a $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, que haja inexistência de condições anormais de radiação e, finalmente, que o termômetro de bulbo úmido esteja desprotegido num local onde a velocidade do ar seja superior a $0,5\text{ m/s}$. Todavia, quando termopares são utilizados, a velocidade do ar pode ser muito próxima de zero, mantendo-se, ainda, a mesma precisão; segundo DOEBELIN (1983).

A temperatura de ponto de orvalho (t_{po}) do ar úmido com umidade absoluta W e pressão (p) foi definida, anteriormente, pela equação 122. Para o caso de gás perfeito, isto se reduz a:

$$p_{H_2O,s}(t_{po}) = p_{H_2O} = \frac{(pW)}{(0,62198 + W)} \quad 147$$

onde

p_{H_2O} = pressão parcial do vapor de água para o ar úmido, Pa

$p_{H_2O,s}(t_{po})$ = pressão do vapor de água saturado, na temperatura t_{po} , Pa.

Para as condições de temperatura entre $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, t_{po} pode ser calculado como se segue:

$$t_{po} = -60,45 + 7,0322\alpha + 0,37\alpha^2 \quad 148$$

e para o intervalo de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, t_{po} pode ser determinada através da seguinte relação:

$$t_{po} = -35,957 - 1,8726\alpha + 1,1689\alpha^2 \quad 149$$

onde

$$\alpha = \ln(p_{H_2O}) \quad 150$$

t_{po} = temperatura de ponto de orvalho, $^{\circ}\text{C}$.

Segundo o comite de normas e padrões da ASAE (1986), definiu-se as seguintes expressões matemáticas para o cálculo de algumas propriedades psicrométricas e geração de tabelas e gráficos dos componentes (ar seco + vapor de água) do ar úmido:

O calor latente de sublimação na saturação (h_{ig}) pode ser calculado da seguinte forma:

$$h_{ig} = 2.839.683,144 - 212,56384(T - 255,38) \quad 151$$

para $255,38 \leq T \text{ (K)} \leq 273,16$.

O calor latente de vaporização na saturação (h_{fg}), apresenta as seguintes equações:

$$h_{fg} = 2.502.535,259 - 2.385,76424(T - 273,16) \quad 152$$

para $273,16 \leq T \text{ (K)} \leq 338,72$ e,

$$h_{fg} = \left(7.329.155.978,0 - 15.995.964,08T^2\right)^{0,5} \quad 153$$

para $338,72 \leq T \text{ (K)} \leq 533,16$.

Na linha de bulbo úmido, tem-se que

$$P_{s,T_{bu}} - P_v = B'(T_{bu} - T) \quad 154$$

para $255,38 \leq T \text{ (K)} \leq 533,16$

onde

$$B' = \frac{1006,9254(p_{s,T_{bu}} - p_{atm}) \left(1 + 0,15577 \frac{p_v}{p_{atm}} \right)}{0,62198 h_{fg,T_{bu}}} \quad 155$$

e

$h_{fg,T_{bu}}$ = calor latente de vaporização da água na temperatura de bulbo úmido, J / kg

$p_{s,T_{bu}}$ = pressão do vapor de água saturado na temperatura de bulbo úmido, Pa

p_v = pressão de vapor da água, Pa

p_{atm} = pressão atmosférica, Pa

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido, K

T = temperatura de bulbo seco , K

Quando $T_{bu} \leq 273,16$, substituir $h_{fg,T_{bu}}$ por $h_{ig,T_{bu}}$.

E, finalmente, a entalpia para a condição igual a entalpia do ar + entalpia da água (ou gelo) na temperatura do ponto de orvalho + entalpia de evaporação (ou sublimação) na temperatura de ponto de orvalho + entalpia adicionada ao vapor de água (super aquecido) após vaporização; pode ser calculada como:

$$h = 1006,9254(T - 273,16) - W \left[333,432,1 + 2,030,598(273,16 - T_{po}) \right] \\ + Wh_{ig,T_{po}} + 1,875,6864 * W(T - T_{po}) \quad 156$$

para $255,38 \leq T \text{ (K)} \leq 273,16$

ou

$$h = 1006,9254(T - 273,16) + 4,186,8 * W(T_{po} - 273,16) \\ + Wh_{fg,T_{po}} + 1,875,6864(T - T_{po}) \quad 157$$

para $273,16 \leq T \text{ (K)} \leq 373,16$

onde

$h =$ entalpia da mistura ar seco - vapor de água, J / kg

$h_{ig,T_{po}} =$ calor de sublimação do gelo, na temperatura de ponto de orvalho, J / kg

$h_{fg,T_{po}} =$ calor latente de vaporização da água, na temperatura (T_{po}), J /kg.

Através das equações e procedimentos descritos acima, desenvolveu-se programas computacionais, na linguagem científica BASIC, para a determinação das propriedades psicrométricas do ar, em diferentes condições, de acordo com cada processo realizado e, posteriormente, comparou-se com outros programas desenvolvidos por AGRAWAL & RAO (1974); WILHELM (1976); ALBRIGHT (1990) e BIAGI & SILVA (1990); produzindo erros máximos da ordem de 5%, entre as principais variáveis determinadas, em relação aos resultados obtidos pelos pesquisadores, acima citados.

3.5 DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS DETERIORÁVEIS E PERECÍVEIS

Como foi mencionado, anteriormente, os processos psicrométricos, principalmente os de aquecimento e resfriamento e seus respectivos desmembramentos, são amplamente utilizados na preservação de produtos agrícolas, quer estes sejam produtos deterioráveis (grãos, sementes, etc.) quer sejam produtos perecíveis (frutas, hortaliças, flores, carnes, ovos, etc.).

Basicamente, a diferença de denominação entre produto deteriorável e perecível está, principalmente, ligada ao teor de umidade contido em cada um dos produtos referidos acima. Portanto, é de se esperar que o produto deteriorável tenha em seu conteúdo uma quantidade de água relativamente menor que o produto perecível.

Outrossim, pode-se notar que alguns processos psicrométricos são mais viáveis para produtos deterioráveis do que para produtos perecíveis e vice-versa, devido, principalmente, a esta característica de quantidade de água. Assim, é comum associar aquecimento para a preservação dos produtos deterioráveis e resfriamento para a conservação dos produtos perecíveis.

Outro aspecto importante a ser mencionado é que tanto os produtos deterioráveis quanto os perecíveis tem exigências específicas no que diz respeito ao teor de umidade ideal de preservação da qualidade, do grau de temperatura a que pode ser submetido para a sua conservação, na vazão de ar a ser empregada e na adição de qualquer produto químico ou biológico com a finalidade de garantir a qualidade do produto.

Assim, como citado por MUCKLE e STIRLING (1971), em PUZZI (1986), as temperaturas máximas de secagem para a soja, segundo seu uso final, são 38 °C para sementes e 48 °C para uso agroindustrial. Portanto, nota-se que para sementes, de um modo geral, as temperaturas de secagem estão relacionadas ao teor de umidade e, observa-se, ainda, que quanto maior o teor de umidade menor deve ser a temperatura de secagem, assim sendo, sementes com teores de umidade superiores a 18%, recomenda-se uma temperatura de 32 °C; entre 10 e 18% a temperatura deve ser de 38 °C; e inferior a 10% de teor de umidade a temperatura de secagem deve ser de 43 °C, segundo HARRINGTON (1973), em BIAGI et alli (1993). O que vem a reforçar a associação do processo de aquecimento ao objetivo de conservação da qualidade dos produtos deterioráveis.

Além do teor de umidade ideal a ser mantido nas sementes, outras propriedades devem ser garantidas, tais como, o teor de germinação e o teste de vigor que irão caracterizar a qualidade da referida semente. Por conseguinte, a adoção de um

processo psicrométrico e respectiva faixa de trabalho, deve visar, sempre, a qualidade do produto final.

Os processos de secagem, isto é, retirada de água do produto deteriorável, podem ocorrer natural ou artificialmente. No primeiro caso, tem-se a colocação do produto úmido em ambiente ensolarado ou à sombra, em condições relativamente secas para que haja a evaporação da água. No segundo caso, o produto é colocado dentro de um secador, onde é submetido à uma corrente de ar aquecida previamente. Em ambos os casos, existem vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e sazonais. Deve-se lembrar, todavia, que o consumo de energia é da ordem de 2500 J para a vaporização de 1 kg. de água, LASSERAN (1979), em BIAGI et alli (1993).

O processo de secagem artificial pode ser dividido em dois tipos: secagem artificial a baixas temperaturas ($T_M < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e secagem a altas temperaturas ($T_M > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e pode-se ter diversos tipos de secadores, a saber: secadores de leito fixo ou de camada fixa, secadores de fluxos cruzados, secadores de fluxos concorrentes, secadores de fluxos contracorrentes e, finalmente, secadores de fluxos mistos (tipo cascata), BIAGI et alli (1993).

Existem diversos fatores ligados à conservação de produtos deterioráveis, tais como, umidade, respiração, temperatura, aquecimento dos grãos armazenados, migração de umidade, umidade de equilíbrio, fungos, insetos e roedores. Quanto a umidade, seu teor pode ser expresso numericamente, em porcentagem, de duas formas distintas, pois o grão é constituído por matéria seca e água, então:

$$U_{bu} = \frac{M_{H_2O}}{M_t} \times 100 = \frac{M_t - M_s}{M_t} \times 100 [\%] \quad 158$$

ou

$$U_{bs} = \frac{M_{H_2O}}{M_s} \times 100 \quad [\%] \quad 159$$

onde:

U_{bu} = umidade base úmida

U_{bs} = umidade base seca

M_{H_2O} = massa de água

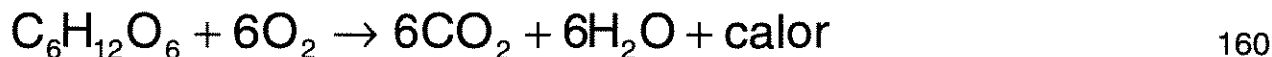
M_s = massa de matéria seca

M_t = massa total do produto = $M_{H_2O} + M_s$.

Além de haver uma relação direta entre as duas equações (158 e 159), existem diversas maneiras de se determinar o teor de umidade de produtos deterioráveis e perecíveis, de forma rápida e precisa, JORGE (1993).

A respiração é um processo natural dos organismos vivos, como é o caso dos grãos, que provoca transformações contínuas no produto e ocorre de uma maneira lenta, em condições de baixa umidade e temperatura adequada.

Em condições de presença de Oxigênio, a respiração consiste na transformação de carboidratos e gorduras em gás carbônico e água, numa reação exotérmica:



A temperatura, além de ser um fator que influencia, por si só, a conservação dos produtos, interfere, ainda, em outros fatores ligados a esta conservação, tais como, umidade, respiração, umidade de equilíbrio, fungos, entre outros.

O aquecimento dos grãos armazenados é provocado, naturalmente, pela respiração, podendo gerar um aumento de temperatura, um acréscimo na taxa respiratória e na umidade.

A migração de umidade ocorre em grãos, geralmente armazenados a granel, mesmo que possuam, inicialmente, o mesmo teor de umidade, devido ao processo de convecção que acontece entre a massa de grãos próxima as paredes e superfícies da unidade armazenadora, que apresenta condições térmicas diferentes da massa de grãos localizada mais internamente à referida unidade.

A umidade de equilíbrio do grão é aquela que ocorre quando a pressão de vapor de água no ambiente iguala-se à pressão de vapor de água no produto. Enquanto houver uma diferença entre estas pressões, haverá uma movimentação do vapor de água no sentido de equilibrar tal diferença, quer no sentido do grão para o ambiente externo, no caso da pressão de vapor de água do grão ser maior que a pressão do vapor de água do ar ambiente ou vice-versa.

O produto deteriorável - sementes de soja - (*Glycine max.*) sofre diversos tratamentos com a finalidade de conservar suas características e propriedades, sendo que a mais comum é a secagem e armazenagem até um valor recomendado, variando de (10 a 12 %). Antes, durante e depois da armazenagem são realizados alguns ensaios para se

determinar o poder de germinação das sementes e verificar os danos ocorridos nas diversas etapas do processo de produção, desde a colheita até a disposição no solo para plantio.

Diversas metodologias de análise de sementes e sua classificação estão descritas pela C.L.A.V (1992) que é considerado pelo Ministério da Agricultura como padrão para o Brasil.

No que diz respeito aos produtos perecíveis (\approx alto teor de umidade), geralmente, como já foi mencionado anteriormente, associa-se o processo psicrométrico de resfriamento para fins de sua preservação, pois a conservação por meio do frio é baseada no fato de que baixas temperaturas retardam o efeito dos agentes deteriorantes assim como reduzem, à níveis compatíveis, a velocidade do processo de maturação. Quanto menor o tempo dispendido para a redução da temperatura ao patamar desejado, melhor a qualidade e maior o período de preservação do produto, NEVES F^o (1993).

Existem diversos ensaios e determinações, com metodologia padronizada, para se determinar as características e qualidade dos produtos perecíveis, de acordo com sua espécie, classificação e finalidade. Os mais tradicionais e importantes para a caracterização do produto e, posterior análise de qualidade, estão na determinação do teor de umidade, dos sólidos totais, sólidos livres de açúcares, cinzas cruas, acidez titulável, nitrogênio total, proteínas, açúcares totais invertidos, açúcar de cana, açúcares reduzidos invertidos, amido, pentosanos, fibras cruas, carboidratos totais, solúveis e insolúveis, vitaminas, taxa de respiração, entre outros.

Devido a enorme e dispendiosa quantidade de ensaios necessários para a caracterização do produto perecível, faz-se necessário a redução e simplificação de ensaios e métodos para se caracterizar a qualidade do produto associada a parâmetros de fácil determinação e baixo custo. Portanto, tem-se optado por ensaios de refratometria (^oBRIX) utilizado para a determinação da porcentagem de sólidos totais determinado por um refratômetro a 20 °C, sem correções feitas para sólidos insolúveis, em soluções que contém açúcar; de pH para averiguação do grau de acidez do produto perecível; a determinação da porcentagem de acidez titulável para a verificação do teor de ácido cítrico no produto e, finalmente a determinação do teor de umidade. Com estes ensaios espera-se caracterizar, de uma forma razoável, a qualidade do produto em diferentes fases de maturação e sob diferentes processos de conservação. A relação entre o estágio de maturação e cada um dos ensaios acima citados visa determinar a qualidade do produto perecível.

Para o estudo de caso com o produto perecível - tomate cereja - (*Lycopersicum esculentum* Mill.) F₁ híbrido SWEET MILLION, uma busca na literatura pertinente trouxe muito pouca informação quanto aos ensaios, anteriormente citados, e sua relação com processos de preservação. Na realidade, alguns resultados conflitantes foram encontrados com as mudanças ocorridas durante a maturação do fruto de tomate, JACOBS (1951). Estas diferenças podem ser atribuídas, talvez, pelo tipo de clima, tipo de solo, época de plantio e época de maturação.

SANDO (1920) usando frutos de idade conhecida determinou que, de uma maneira geral, durante a maturação há um acréscimo do teor de umidade, acidez, açúcares e, um decréscimo na porcentagem de sólidos totais, nitrogênio total, amido, pentosanos, fibra crua e cinzas.

Segundo STEVENS (1985), o fruto do tomate contém entre 93 a 94 % de água e o componente orgânico que mais prevalece é o açúcar. Os açúcares reduzidos de frutose e glucose contam por mais de 50 % da matéria seca do fruto e mais de 95 % dos açúcares do tomate, ocorrendo em quantidades equivalentes. Os componentes estruturais do fruto (álcool - sólidos insolúveis) são o outro principal constituinte (cerca de 20 % da matéria seca). Esta fração é uma complexa mistura de polissacarídeos e poligalacturonídeos, componentes estes fundamentais para a textura e vida própria do fruto. Os ácidos orgânicos constituem cerca de 10 a 15 % da matéria seca e dentre eles, destaca-se como o mais importante o ácido cítrico com uma faixa de 60 a 90 % do conteúdo de ácidos do fruto. Ácido málico responde por uma quantidade inferior a 30 % do conteúdo de ácido cítrico. Potássio e fósforo são os principais componentes inorgânicos e atuam diretamente no sabor e, teor de acidez e pH - total, respectivamente. Finalmente, outros componentes inorgânicos importantes são o Sódio, Cálcio, Magnésio, Enxofre e Cloro.

HONÓRIO (1993) descreve que os fatores biológicos encontrados na deterioração de um produto perecível ocorre quando existem mudanças metabólicas, crescimento e desenvolvimento, danos ou injúrias mecânicas, perda de umidade, estresse fisiológico e deterioração patológica. O perfeito manejo da temperatura do produto perecível na fase de pós-colheita é fundamental para a manutenção da qualidade e redução das perdas dos produtos.

GOULD (1974) propõe métodos subjetivos e objetivos para a avaliação da qualidade do tomate. Como os métodos subjetivos dependem da opinião pessoal de especialista, as legislações de controle de qualidade tem, cada vez mais, adotado métodos objetivos. Tais métodos podem ser divididos em três categorias: físicos, químicos e biológicos. Os métodos físicos são os mais rápidos e econômicos dentre os métodos, citados anteriormente, que requerem, ainda, menos treinamento e pessoal qualificado. Os parâmetros a serem determinados são: tamanho, peso, cor, textura, consistência e imperfeições. Já os métodos químicos requerem instrumental e pessoal treinado e qualificado e, portanto, são mais dispendiosos, embora alguns, também sejam ensaios rápidos, tais como, acidez total, ph, sólidos totais, sólidos solúveis e insolúveis, taxa de respiração, vitaminas e enzimas, dentre outros. E, finalmente, os métodos biológicos, que, também, exigem instrumental e pessoal técnico mais qualificado, além de serem, de certo modo, demorados e dispendiosos.

3.6 CONCLUSÃO

Observa-se que a avaliação exergética de sistemas térmicos, vem sendo, paulatinamente, usada em trabalhos científicos e técnicos, na sua grande maioria por engenheiros e pesquisadores da área térmica e de energia, em engenharia mecânica; principalmente, quando se trata de projetos vinculados a otimização de sistemas, processos, equipamentos e, economia de energia.

Realizando uma recente revisão dos trabalhos publicados pela ASAE (American Society of Agricultural Engineers) notou-se que a maioria dos casos relacionados à Termodinâmica usa o conceito derivado da 1ª Lei da Termodinâmica. A razão possível é que os pesquisadores e engenheiros desta área estão mais confortáveis usando propriedades de energia, tais como entalpia e energia interna, ao invés da propriedade derivada da 2ª Lei: entropia. Porém, como já foi enfatizado anteriormente, os conceitos da 1ª Lei da Termodinâmica, não levam a uma solução ótima, em muitos casos, onde os problemas termodinâmicos estão sendo tratados.

Nesta mesma revisão, percebeu-se que os processos psicrométricos para fins de preservação de produtos perecíveis e deterioráveis eram superficialmente abordados, no que diz respeito a otimização de tais processos, assim como uma análise criteriosa de sistemas e fontes energéticas geradoras de um condicionamento do ar a serem utilizados.

Em função do exposto anteriormente, é necessário e fundamental uma avaliação exergética (1ª e 2ª Leis) comparada com a avaliação energética (1ª Lei) dos principais processos psicrométricos utilizados na preservação de produtos agrícolas assim como uma análise das fontes geradoras de tais processos, a fim de se determinar sistemas e processos menos irreversíveis, isto é, mais econômicos.

Quanto menos irreversibilidade estiver associada a uma dada mudança de estado mais trabalho será realizado. Isso é significativo em pelo menos dois aspectos. O primeiro é que a disponibilidade (exergia) é um dos nossos recursos naturais (lenha, óleo, carvão, gás, eletricidade, etc). Como, geralmente, o trabalho real é menor do que o trabalho reversível, e a diminuição da disponibilidade será maior (pela quantidade de irreversibilidade) do que no caso em que este trabalho é produzido reversivelmente. Assim, quanto mais irreversibilidade há em nossos

processos, maior será a diminuição de nossas reservas de disponibilidade. A conservação e, portanto, o uso eficiente destas reservas de disponibilidade é uma responsabilidade importante para todos nós VAN WYLEN & SONNTAG (1993).

A segunda razão pela qual é desejável alcançar um dado objetivo com a menor irreversibilidade, é a econômica. O trabalho custa dinheiro e em muitos casos um dado objetivo pode ser conseguido com menor custo, quando a irreversibilidade for menor, GAGGIOLI & WEPFER (1980). Portanto, é necessário um processo de otimização que envolva a consideração de muitos fatores para se chegar ao projeto mais econômico, todavia viável tecnicamente VAN WYLEN & SONNTAG (1993).

MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

4.1.1 Introdução

Os experimentos e análises foram conduzidos, durante o primeiro semestre de 1996, nas dependências dos Laboratórios de Secagem, de Armazenagem e Conservação de Perecíveis, de Matérias Primas e de Análise de Sementes, do Departamento de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários da Faculdade de Engenharia Agrícola. O Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (**SIGEP**) estava localizado a uma altitude de 684,54 metros em relação ao nível do mar, determinada através do aparelho GPS, que equivale a uma pressão atmosférica de 93.333,3 Pa, segundo a equação dada por ALBRIGHT (1990) e; situado geograficamente, na latitude 22° 49' 06" Sul e longitude 47° 03' 41" Oeste.

As pressões totais geradas pelo SIGEP foram determinadas conforme metodologia consagrada e, os resultados encontram-se no Apêndice AP - 03.

4.1.2 Sistema de condicionamento do ar

Para se atender os objetivos propostos, fêz-se necessário a adaptação de um sistema de geração de condicionamento de ar¹ através de um ciclo de refrigeração por compressão acoplado a um conjunto de resistências elétricas e um sistema de umidificação, via saturação do ar por pulverização de água (Fig. 4.1.2.1.), existente no departamento.

¹ Sistema idealizado pelo Prof. Dr. Kil Jin Park et al.; financiado parcialmente pela FINEP/Código Projeto 5.2.86.0742.00 (08/10/86), existente na FEAGRI/UNICAMP.

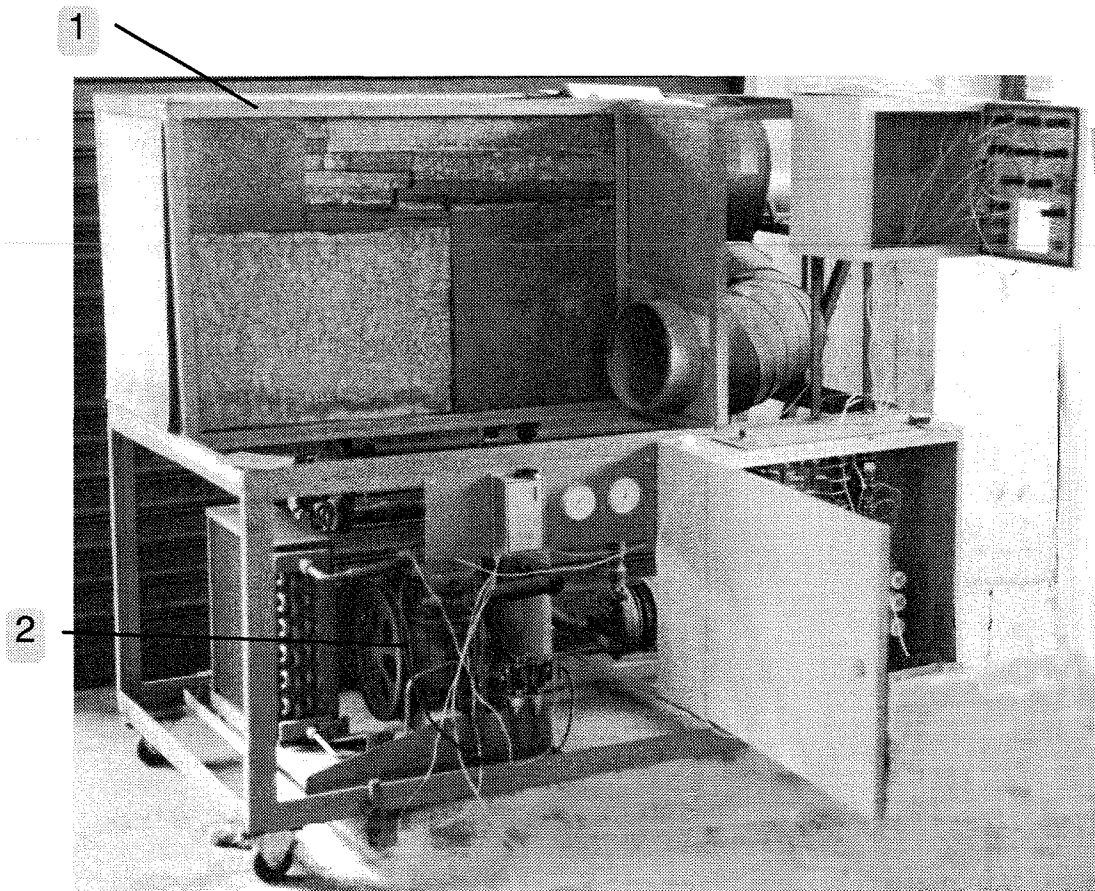


Figura 4.1.2.1. Esquema da Unidade de Condicionamento de Ar.

Com tal sistema visa-se realizar os seguintes processos psicrométricos de condicionamento de ar: aquecimento, resfriamento, mistura adiabática de duas correntes de ar, utilizando variações na temperatura e umidade relativa do ar para fins de comparação e avaliação técnica e econômica. A unidade de refrigeração (2) utilizada tem a função de resfriar a água contida num tanque de inox (9), o bombeamento com recirculação é feito através de uma bomba centrífuga (13) com válvula de regulagem (12) e pulverizada por bicos aspersores (7). A tubulação e dutos externos estão isolados. O tanque de aço inox (9) é dotado de um conjunto de serpentinas (10) para o resfriamento da água e de resistências elétricas (11) para aquecimento da mesma, a finalidade deste sistema é a completa saturação do ambiente e, conseqüentemente, do ar de entrada (1). Para assegurar a saturação ambiental, referida anteriormente, construiu-se placas defletoras transversais (8) afim de aumentar a área de contato ar-água, possibilitando, com isso, um maior percurso do ar e melhor eficiência na transferência de calor-massa (Fig. 4.1.2.2.).

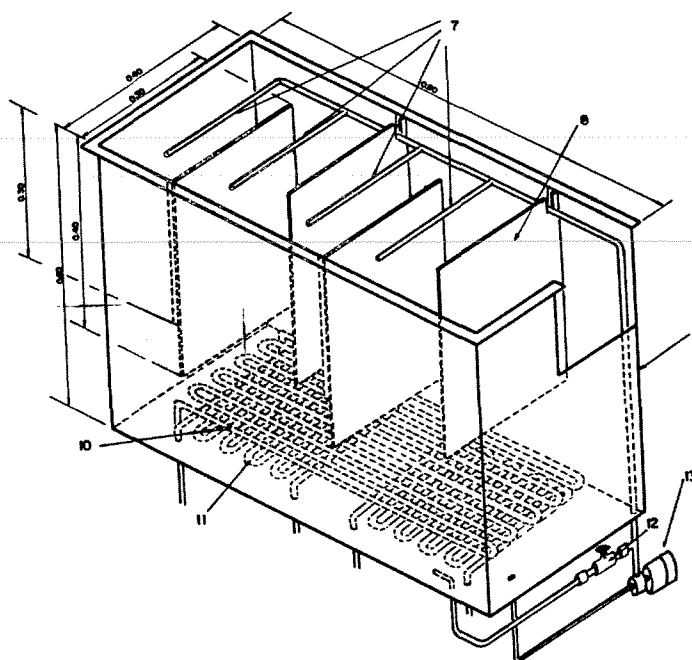


Figura 4.1.2.2. Detalhes das Resistências Elétricas e Placas Defletoras do Ar.

Além dos equipamentos, acima descritos, foi adicionado um evaporador de expansão direta, instalado em câmara própria, para fins de resfriamento do ar de maneira convencional e testes com produtos perecíveis (frutas, hortaliças, flores, etc), câmara esta, provida de bandejas adequadas para recebimento do produto perecível, com fluxo de ar transversal e, sistema de dutos independentes e isolados. Tal sistema, todavia, trabalha com o mesmo compressor e condensador da unidade de resfriamento da água, apenas operando com válvula solenóide própria e válvulas e registros de desvio do fluido refrigerante². Todo este conjunto de equipamentos e a adição de controles foi denominado de **SIGEP (Sistema Gerador de Processos Psicrométricos)**.

Os desenhos e as especificações técnicas dos diversos equipamentos que compõem o SIGEP estão descritas nos Apêndices AP - 01 e 02.

² Adaptação idealizada e realizada por Paulo A. Martins Leal e José Benedito dos Santos, a fim de atender os objetivos propostos (Novembro/1995).

4.1.3. Sistema Gerador de Processos Psicrométricos

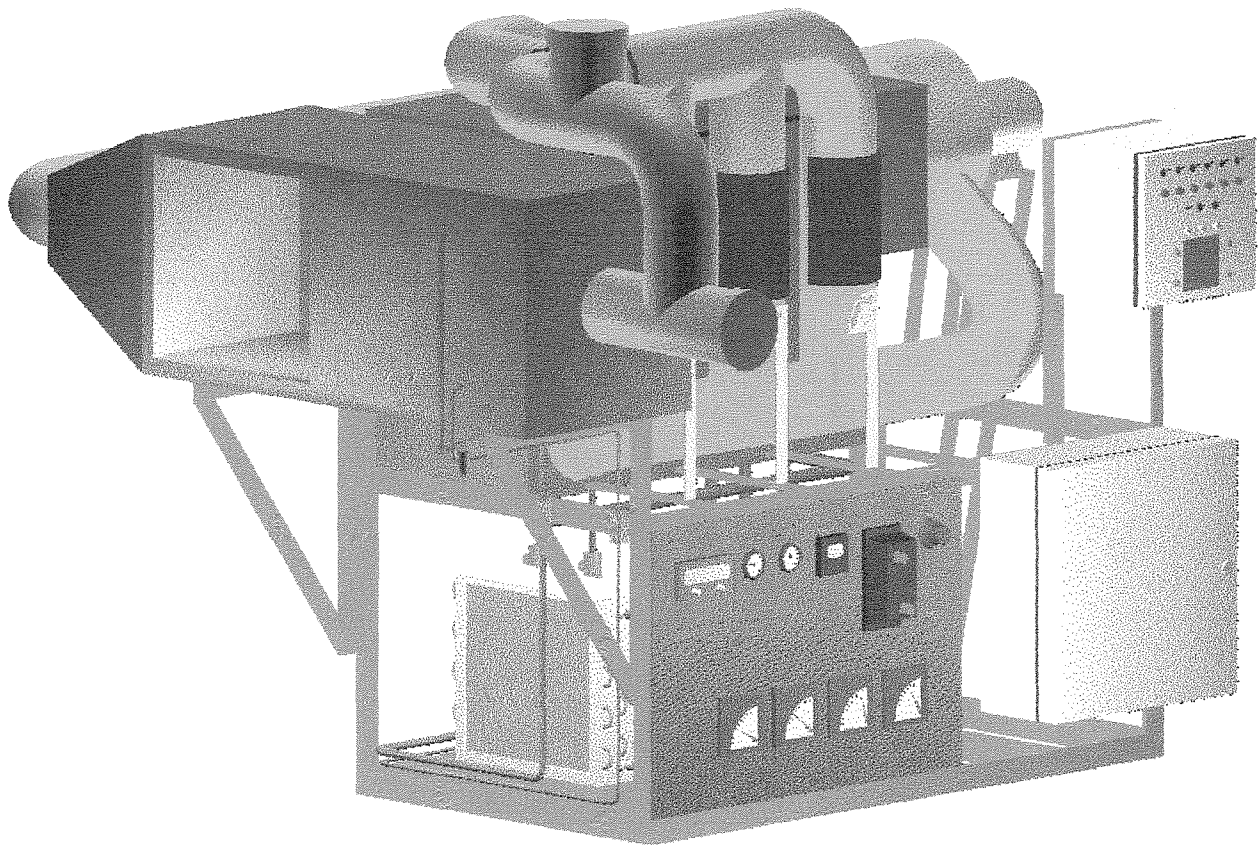


Figura 4.1.3.1.1 Visualização do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos

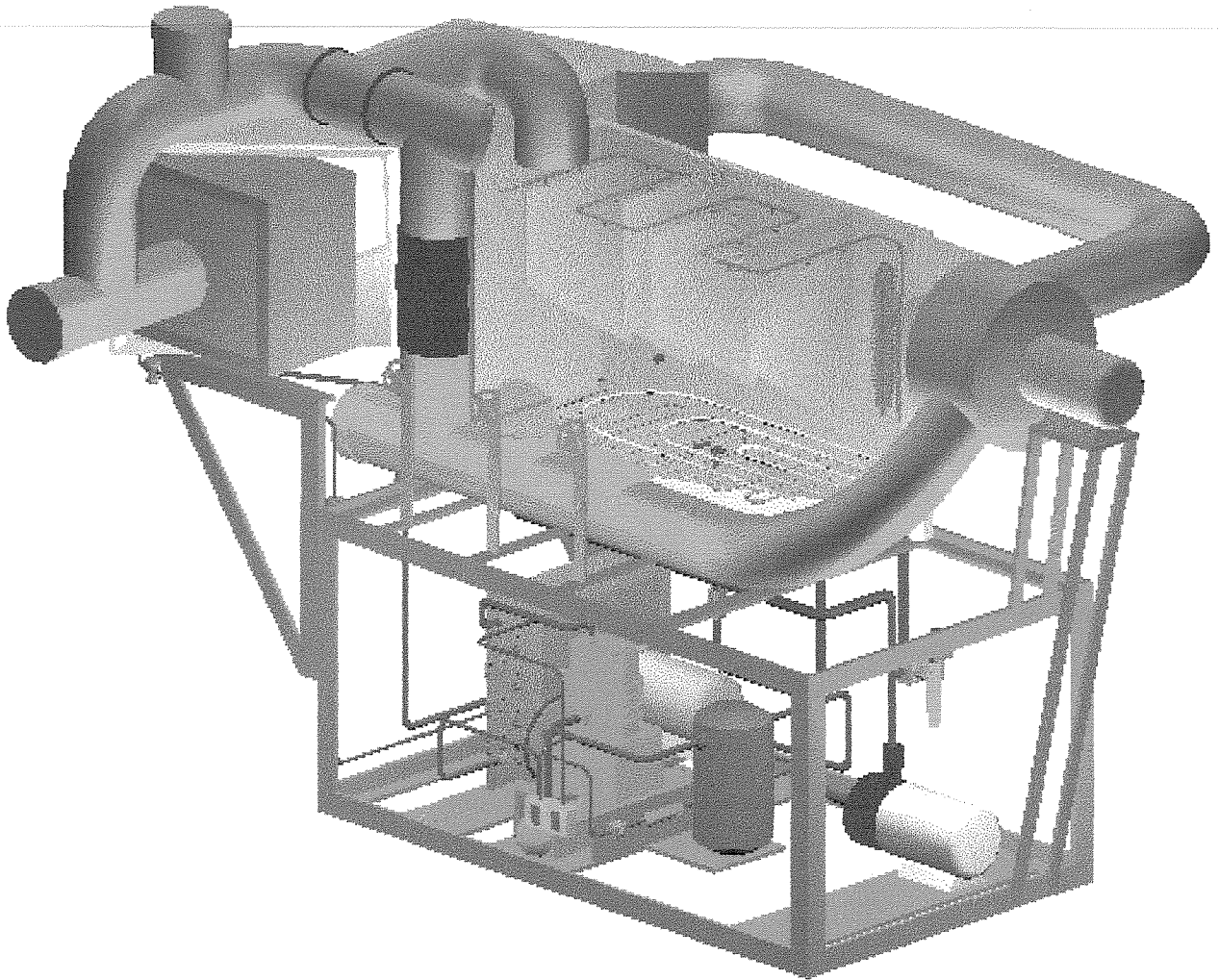


Figura 4.1.3.1.2 Vista em Corte do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos

O **SIGEP** é constituído pelos seguintes equipamentos:

-Refrigeração:

Motor elétrico de indução trifásico em voltagem de 220 V, com corrente alternada de 5 A e potência de 1,5 CV a 1725 RPM e 60 Hz;

Compressor BITZER-FRIGOR, modelo III-S, tipo aberto com cabeçote resfriado a ar e dois cilindros e, diâmetro de polia de 75mm, fornecendo uma capacidade de refrigeração de 475 a 1895 kcal/h (552 a 2202 J/s), referente a temperatura do gás de sucção de 20 °C sem subresfriamento, com a temperatura de evaporação de -26 a 0 °C do refrigerante Diclorodifluormetano (CCl_2F_2), comercialmente nomeado como R12.

Além dos equipamentos acima citados o sistema de refrigeração possui tanque de líquido, válvula de serviço, válvula solenóide, filtro secador, visor de líquido, duas válvulas de serviço para mudança de fluxo, duas válvulas de expansão, sendo uma para a serpentina de resfriamento da água e a outra para o resfriamento do evaporador de ar, separador de líquido, condensador resfriado a ar forçado, dois evaporadores, sendo um do tipo serpentina com 14,40 metros de comprimento de tubulação de cobre de diâmetro de 19,05 mm e o outro do tipo aletado com área de contato de 6,4 m².

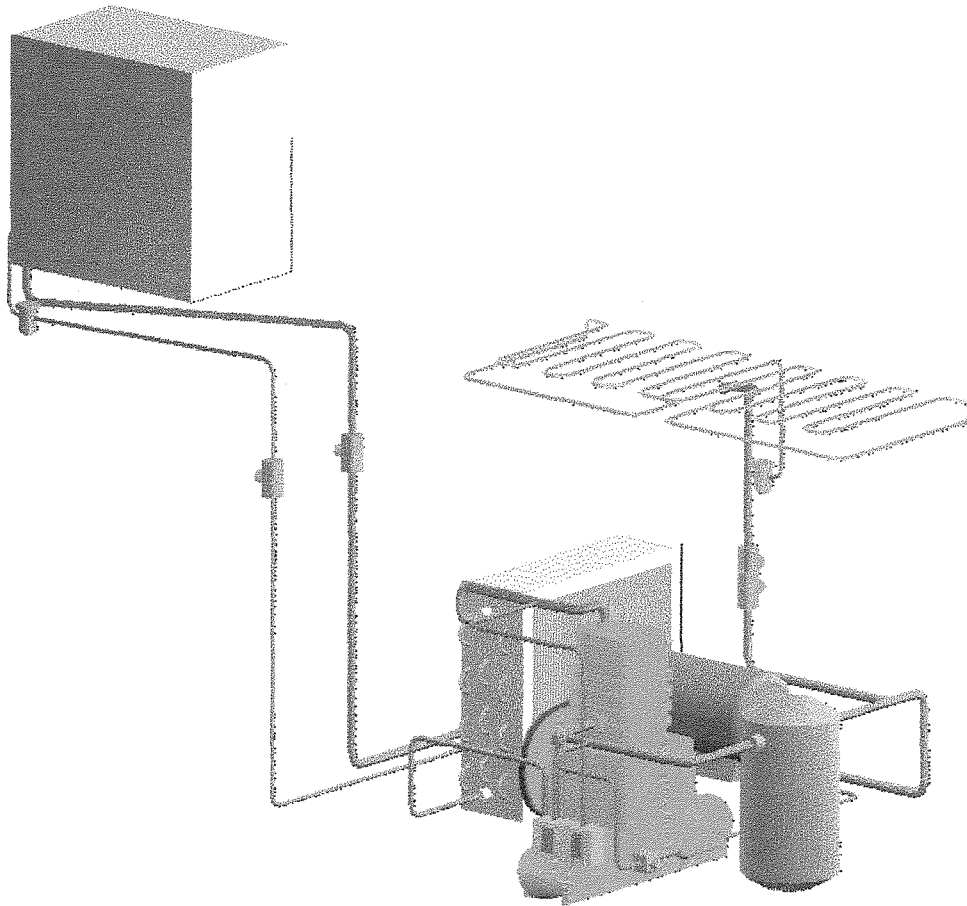


Figura 4.1.3.2 - Visualização do Circuito de Refrigeração

-Umidificação:

Motor elétrico de indução monofásico em 220 V com corrente alternada de 7,8 A e potência nominal de 1,0 CV em 3450 RPM e frequência de 60 Hz.

Bomba hidráulica centrífuga de 1,0 CV de potência com 25,4 mm de diâmetro de tubulação de entrada e saída.

Sistema de tubulação flexível em latão com 25,4 mm de diâmetro e 3 registros, tipo gaveta, para circulação e desvio da água do tanque.

Sistema de umidificação por aspersão da água através de um conjunto de 11 microaspersores com vazão média de 1,32 ml/s, por aspersor e, vazão total de 52,2 l/h numa pressão de trabalho de 1,25 kgf/cm² em tubulação de aço inoxidável com diâmetro de 19.05 mm.

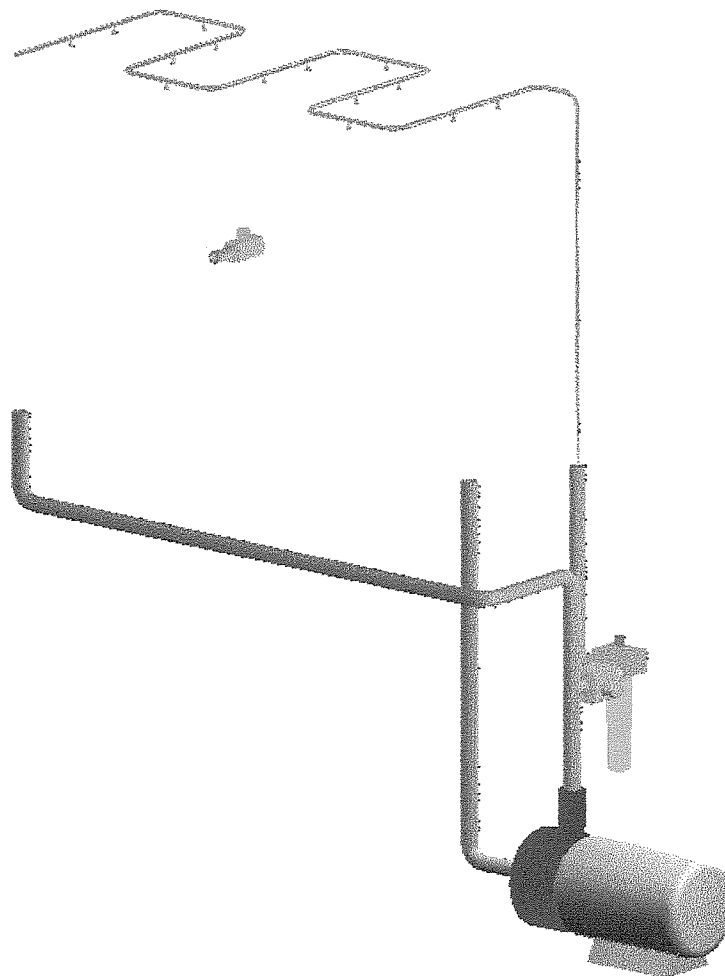


Figura 4.1.3.3 - Visualização do Circuito de Umidificação

-Circulação de ar:

Ventilador centrífugo de pás retas com 350 mm de diâmetro em duralumínio e acoplamento por chaveta.

Motor de corrente contínua de 90 VCC e 11,2 A de corrente, produzindo uma potência mecânica de 735 W (sendo 1010 W de potência absorvida na armadura e 120 W de potência absorvida no campo).

Conversor de corrente alternada para corrente contínua, do tipo: ponte tiristorizada semi-controlada com alimentação de 100 a 130 V e frequência de 60 Hz, produzindo uma corrente máxima de saída de 15 A.

Tubulação de PVC, com 150 mm de diâmetro, isolada com Isopor de 50mm de espessura e revestido por folha de alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura, num comprimento total de 8,50 m.

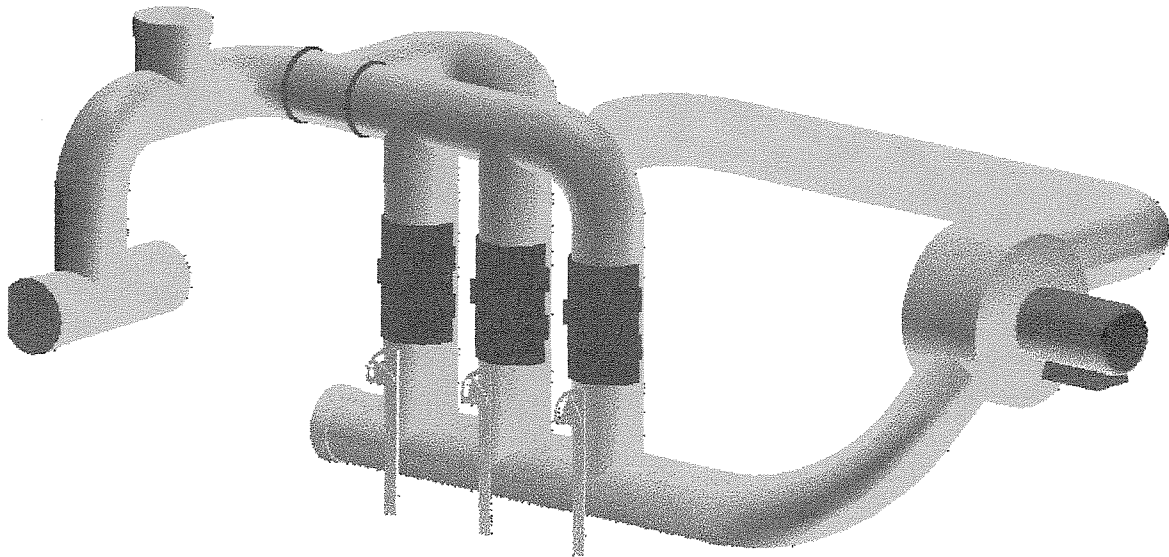


Figura 4.1.3.4 - Visualização do Circuito de Circulação de Ar

-Aquecimento:

Sistema composto por dois conjuntos distintos de resistências elétricas:

O primeiro é do tipo aletado, possuindo acionamento por chave elétrica individual, permitindo a ligação independente de uma resistência de (220 V/2,8 A) 616 W; duas resistências de (220 V/6,9 A) 1518 W e, finalmente, duas resistências de (220 V/7,6 A) 1672 W, localizadas numa câmara de condicionamento de ar de (31 x 24 x 33 mm) 24,6 cm³, anterior ao plenum de ventilação.

O segundo é do tipo cilíndrico, em forma de arco, acionado, também, por chave magnética, permitindo a ligação individual de uma resistência de (220 V/1.8 A) 396 W; uma de (220 V/0.6 A) 132 W e uma de (220 V/5.8 A) 1276 W, localizadas na parte inferior da câmara de condicionamento 1, sobre o evaporador inundado.

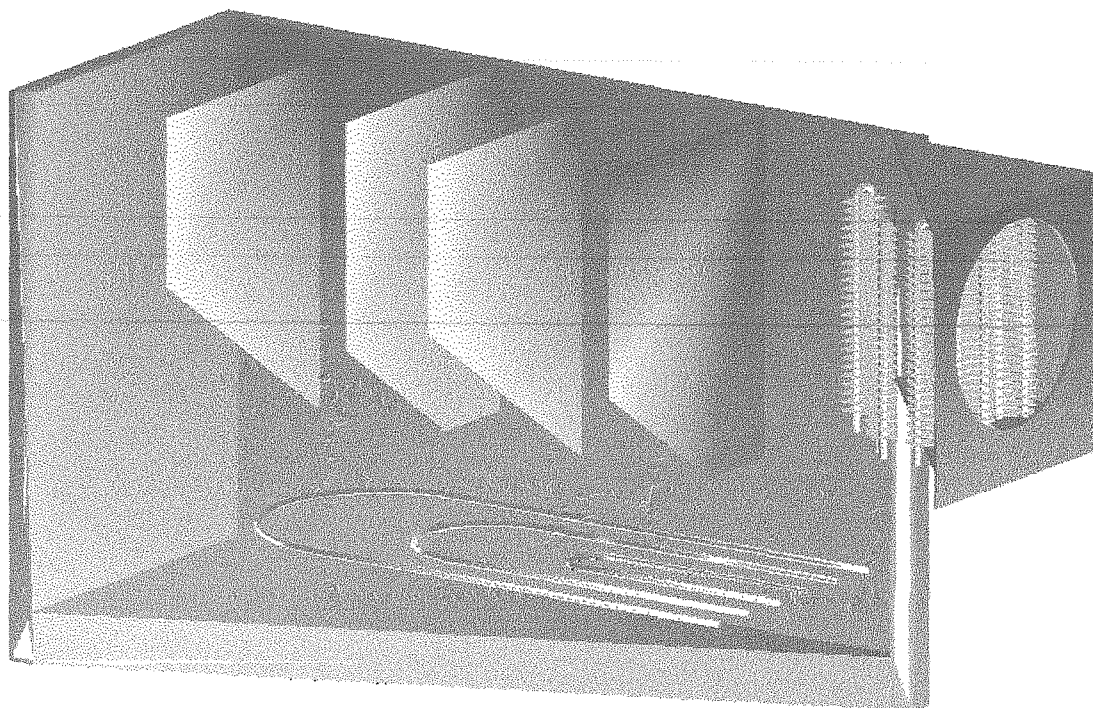


Figura 4.1.3.5 - Visualização dos Sistemas de Aquecimento da Água e do Ar.

-Câmaras de condicionamento:

O **SIGEP** possui cinco câmaras distintas de condicionamento, sendo duas para condicionamento dos produtos e três para o ar.

Quanto as câmaras para condicionamento dos produtos, uma foi construída para armazenar produtos deterioráveis(grãos, sementes, etc.) e, é composta por três cilindros paralelos de PVC com diâmetro externo de 150 mm e altura útil de 300 mm, possuindo, todas, uma porta de 200mm por 240mm, com fecho central de pressão, de onde é possível colocar e retirar gaiolas de tela com os produtos; isolada com 50 mm de de espessura de Isopor, em forma de canaleta e, revestida com alumínio corrugado de 1.2 mm de espessura.

Na parte inferior destes cilindros encontram-se válvulas de regulagem de fluxo de ar individual e manual, do tipo borboleta. Todos os cilindros e conexões foram isolados da mesma forma que a tubulação de circulação do ar.

A segunda câmara de condicionamento de produtos foi construída em alumínio de 3 mm de espessura com 540 mm de comprimento por 410 mm de largura e 400 mm de altura, perfazendo um volume útil de $88.560,0 \text{ cm}^3$. Tal câmara tem a finalidade de armazenar produtos perecíveis(frutas, hortaliças, flores, etc.), sendo isolada

externamente por placas de polietileno expandido de 20 mm de espessura e revestida por papel alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura, possuindo uma porta, com as mesmas características do material da câmara com 435 mm de comprimento por 405 mm de altura e 25 mm de espessura. Possui, internamente, duas bandejas para colocação dos produtos, suspensas na parte superior por arame, instaladas no centro geométrico da câmara, logo após o evaporador aletado.

A primeira câmara de condicionamento do ar encontra-se na parte posterior do **SIGEP**, sendo construída em aço inoxidável na parede interna possuindo 0,90 m de comprimento por 0,40 m de largura e 0,60 de altura propiciando um volume útil de 0,22 m³, isolada, externamente, com poliuretano expandido de 25 mm de espessura mínima e revestida, externamente, por chapa galvanizada de 1,0 mm de espessura. No interior desta câmara encontram-se o evaporador tipo serpentina e, logo acima deste, as três resistências elétricas blindadas tipo arco, onde ambos estão submerso em água, que atinge uma altura máxima de 210 mm. No topo desta câmara localiza-se o sistema de aspersão de água que percorre um caminho definido pelas placas defletoras, que estão encaixadas nas paredes laterais, a fim de aumentar o percurso do ar e, por conseguinte, a área de transferência de calor e massa. A tampa da referida câmara é feita de chapa galvanizada de 1,0 mm de espessura com isolamento de isopor de 50 mm de espessura e vedada nas bordas com borracha preta expandida de 10 mm. Na parte superior esquerda, da referida tampa, encontra-se uma abertura de 150 mm de diâmetro para sucção e/ou circulação do ar e, na parte lateral direita, há uma abertura quadrada de 215 mm que permite a passagem para a segunda câmara de condicionamento de ar.

A segunda câmara de condicionamento de ar localiza-se logo após a primeira e está anterior ao plenum de ventilação possuindo as seguintes dimensões 280 mm por 215 mm por 310 mm. A abertura lateral esquerda tem as mesmas dimensões que a abertura da primeira câmara, possuindo nesta interface uma tela dupla de arame recheada com manta acrílica de 5 mm de espessura, com parede externa de aço inoxidável de 1,0 mm de espessura e parede interna de chapa galvanizada de 1,2 mm, recheada com isolamento de poliuretano expandido de 25 mm de espessura. A abertura lateral direita tem um diâmetro de 230 mm numa parede interna e externa de chapa galvanizada de 1,0 mm, com isolamento interno e externo de borracha expandida rígida preta de alta densidade de 15 mm de espessura, revestida externamente por chapa de alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura. A abertura posterior, que faz comunicação com a câmara de produtos perecíveis possui um diâmetro de 150 mm, com material e características de isolamento similares àquela da primeira abertura.

A terceira e última câmara de condicionamento do ar encontra-se na lateral esquerda do sistema, após os cilindros de produtos deterioráveis e, anterior à câmara de condicionamento dos produtos perecíveis. Possui uma abertura de 150 mm de diâmetro localizada no centro da parede anterior, apresentando 320 mm de comprimento por 410 mm de largura e 400 mm de altura, sendo confeccionada e isolada com os mesmos materiais da câmara de condicionamento de produtos perecíveis. Nela encontra-se o evaporador de ar e comunica-se com a parte anterior, através de tubulação já descrita e, com a parte posterior (câmara de produtos perecíveis) através de uma abertura de 410 mm por 400 mm, separada por tela de arame de aço inoxidável.

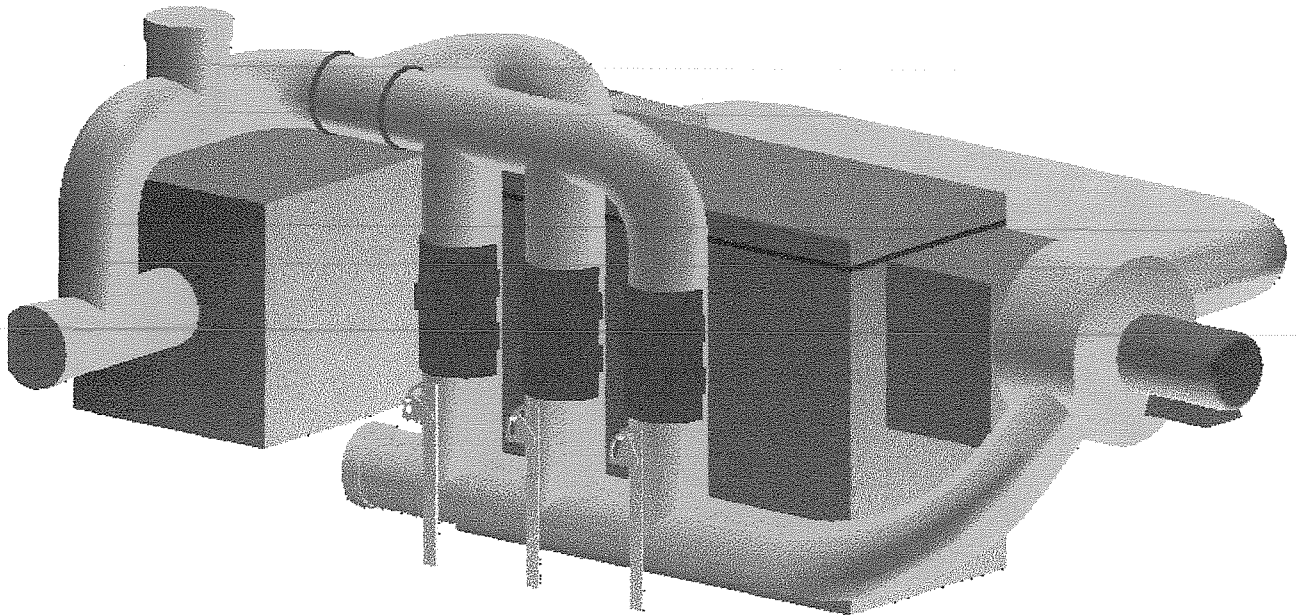


Figura 4.1.3.6 - Visualização das Câmaras de Condicionamento

-Sistema de acionamento e controle:

O Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (**SIGEP**) possui três painéis ou compartimentos onde se encontram todas as chaves de acionamento e controle, além do instrumental para monitoramento e variação dos parâmetros de cada processo; tais painéis estão na parte frontal do **SIGEP** com a seguinte distribuição:

O primeiro painel e compartimento, com 300 mm por 300 mm por 225 mm, encontra-se na parte superior direita e, possui chaves, tipo liga-desliga, e luzes indicadoras para acionamento dos sistemas de refrigeração, ventilação, bomba hidráulica, três resistências de aquecimento do ar, três resistências de aquecimento da água e, na sua parte interna a chave de variação da velocidade do ar.

O segundo compartimento, com 600 mm por 500 mm por 200 mm, situado logo abaixo do primeiro possui, na sua parte interna, uma chave contatora para cada equipamento(ventilador, bomba, resistências do ar e da água e, compressor), um disjuntor trifásico de acionamento rápido para proteção contra sobrecarga no barramento, três fusíveis tipo rápido, um para cada fase de entrada do circuito elétrico, tomada fêmea de 5 pinos para conexão com as três fases mais neutro e terra, além disso o circuito externo é protegido por um disjuntor termomagnético tripolar de 25 A.

O terceiro painel, com 755 mm por 575 mm por 2 mm, está situado à esquerda do segundo compartimento e possui um combistato (termômetro/termostato) digital com escala de -65°C a 130°C para controle da refrigeração, um termostato-umidostato com escala de -10°C a 100°C de temperatura de bulbo seco e variação de 20°C entre bulbo seco e bulbo úmido para controle do sistema de umidificação, um termômetro digital de -30°C a 100°C , para visualização da temperatura na entrada das câmaras de produtos deterioráveis, um termostato de proteção com escala de 0°C a 100°C , um manômetro de alta com pressão de 0 a 35 kgf/cm^2 (0 a 500 psi) e temperatura

correspondente de 0 a 160 °F e, outro manômetro de baixa com escala de pressão de 0 a 17,5 kgf/cm² (0 a 250 psi) e temperatura equivalente de -40 a 100 °F, analógicos, para leitura da pressão no sistema de refrigeração e quatro wattímetros analógicos para a leitura da potência consumida pelos sistemas de refrigeração (0 a 3000 W), ventilação (0 a 1500 W), bomba hidráulica (0 a 2000 W) e geral (0 a 3000 W), todos com precisão de 100 W e com seus respectivos transformadores de corrente para atender ao fundo de escala dos wattímetros.

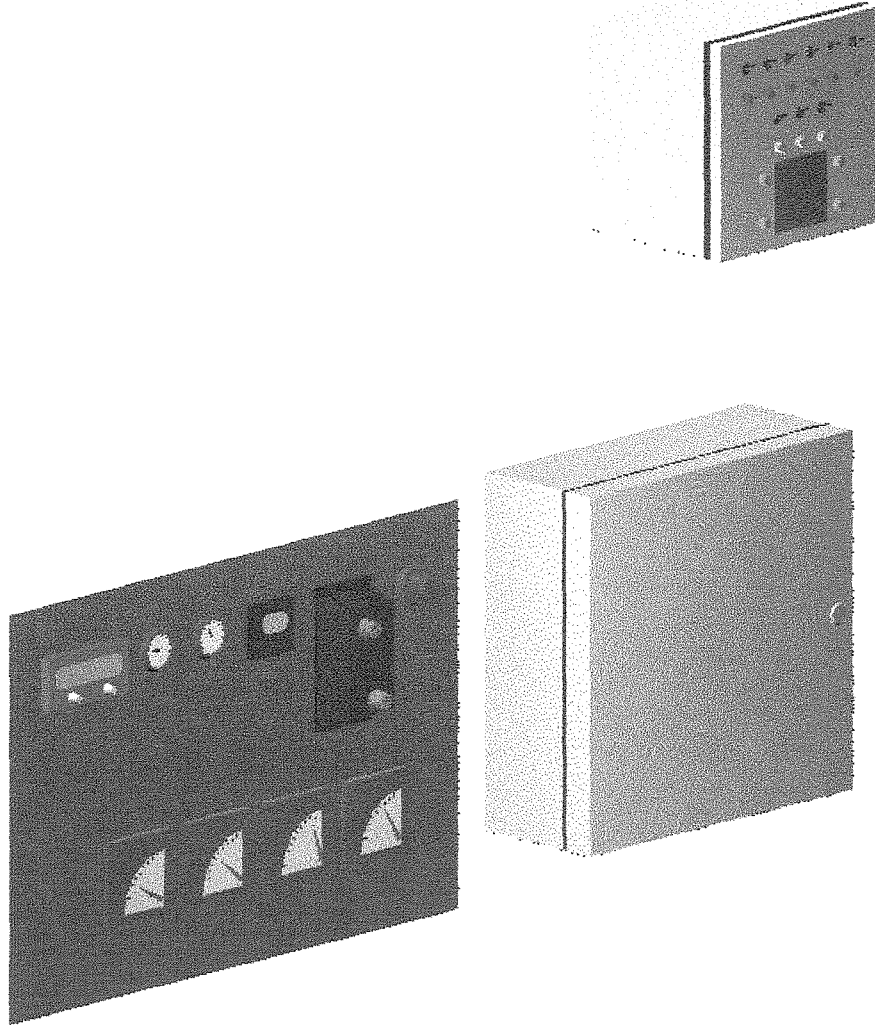


Figura 4.1.3.7 - Visualização dos Painéis de Acionamento e Controle

4.1.4 Sistema de aquisição de dados e monitoramento:

Acoplado ao **SIGEP** encontrava-se um filtro de linha e um regulador e estabilizador de voltagem para alimentação do sistema de aquisição de dados, equipamento este munido de 48 canais diferenciais, onde estavam conectados 29 termopares, tipo J, K e T, para medidas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar, temperatura da água, temperaturas de contato em diferentes superfícies e localizações do SIGEP, devidamente calibrados, conforme demonstrado no Apêndice AP - 04.

Os 29 canais do sistema de aquisição de dados em operação estavam ligados aos seguintes termopares e respectivas localizações (maiores detalhes de localização e descrição encontram-se no Apêndice 01, a partir da Figura AP - 1.6):

- Canal 01, tipo T, temperatura na tubulação de sucção do compressor;
- Canal 02, tipo T, temperatura na tubulação de descarga do compressor;
- Canal 03, tipo K, temperatura na tubulação de saída do tanque de refrigerante;
- Canal 04, tipo K, temperatura na tubulação de saída da válvula de expansão 1;
- Canal 05, tipo K, temperatura na tubulação de entrada da válvula de expansão 1;
- Canal 06, tipo J, temperatura (B.S) do ar na entrada da câmara de deterioráveis 1;
- Canal 07, tipo J, temperatura (B.S) do ar na entrada da câmara de deterioráveis 2;
- Canal 08, tipo J, temperatura de contato das resistências elétricas;
- Canal 09, tipo T, temperatura da água na base do tanque;
- Canal 10, tipo T, temperatura da água na tubulação de saída do tanque;
- Canal 11, tipo T, temperatura da água na tubulação de entrada da bomba;
- Canal 12, tipo T, temperatura da água na tubulação de entrada da rede externa;
- Canal 13, tipo T, temperatura (B.S) do ar de entrada da câmara de deterioráveis 3;
- Canal 14, tipo T, temperatura (B.S) do ar na saída da câmara de produto perecível;
- Canal 15, tipo J, temperatura (B.U) do ar na saída da câmara de produto perecível;
- Canal 16, tipo K, temperatura da água na saída do último aspensor;
- Canal 17, tipo K, temperatura da água de condensação do evaporador 2;
- Canal 18, tipo K, temperatura na tubulação de saída da válvula de expansão 2;
- Canal 20, tipo J, temperatura (B.S) do ar após câmara de deterioráveis 3;
- Canal 21, tipo T, temperatura (B.U) do ar após câmara de deterioráveis 3;
- Canal 22, tipo T, temperatura (B.S) do ar após sistema de ventilação;
- Canal 23, tipo J, temperatura (B.U) do ar após sistema de ventilação;
- Canal 24, tipo K, temperatura (B.S) do ar após a câmara de condicionamento 1;
- Canal 25, tipo K, temperatura (B.U) do ar após a câmara de condicionamento 1;
- Canal 26, tipo K, temperatura (B.S) do ar ambiente externo;
- Canal 27, tipo K, temperatura (B.U) do ar ambiente externo;
- Canal 29, tipo K, temperatura de contato da superfície número 1;
- Canal 30, tipo T, temperatura de contato da superfície número 2;
- Canal 31, tipo T, temperatura de contato da superfície número 3.

Observação: Os três últimos termopares eram alocados em diferentes locais de acordo com cada processo e necessidade.

O sistema de aquisição de dados envia, por programas específicos, a um PC-486 DX2, os dados para visualização na tela ou armazenamento em disco rígido a cada segundo, dependendo de cada processo em operação.

4.1.5 Instrumental de apoio

Além dos equipamentos, aparelhos e instrumentos diretamente ligados ao SIGEP, outros instrumentos foram utilizados durante os experimentos, a fim de se determinar propriedades e parâmetros de interesse.

-Medição da altitude, latitude e longitude para localização do SIGEP:

Através do aparelho GPS, MARCH 1, com precisão de ± 5 m para a altitude e de ± 100 m para a latitude e longitude, determinou-se a localização do SIGEP.

-Medição da Pressão Total (perda de carga) do SIGEP:

Com o auxílio do manômetro inclinado, DWYER, com escala de velocidade de 500 a 9000 pés/min. e pressão (ΔP) de 0 a 5 pol. H₂O.

-Medição da potência elétrica requerida:

Além dos Wattímetros, citados anteriormente, utilizou-se de um alicate Volt-Amperimétrico Digital com fundo de escala de 1 V e 0.1 A.

-Medição da velocidade do ar:

As medidas de velocidade do ar e sua variação foram feitas através de termoanemômetro digital de fio quente, com duas escalas de velocidade, 0 a 2m/s e 0 a 30 m/s e, uma escala de temperatura de -30° C a 100° C. Tais medidas foram comparadas com o anemômetro de pás de 100 mm de diâmetro, com escala de 0 a 12 m/s.

-Medição de temperatura de bulbo seco e úmido do ar:

Além das medidas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar, em diversos pontos do SIGEP e do ar externo através de termopares e bainhas apropriadas, mediu-se, também, as temperaturas de bulbo seco e úmido do ar externo por um termohigrógrafo para efeito de comparação.

-Medição de pH:

No estudo de caso utilizando o produto perecível tomate, tipo cereja, mediu-se o valor do pH por um pHmetro digital, modelo de bancada.

-Medição de grau Brix:

A medição de $^{\circ}$ Brix do produto perecível foi realizada por um refratômetro portátil com escala de 0 a 32° .

-Medição da acidez titulável:

Para a medição da acidez titulável utilizou-se um pHmetro digital, bequer e pipeta graduados, agitador giratório e solução normalizada de hidróxido de sódio (NaOH).

-Medição do teor de umidade:

Na determinação do teor de umidade dos produtos perecível e deteriorável fez-se uso de uma estufa com circulação de ar forçado, balança digital de precisão de prato suspenso, cadinhos e placas de Petri. Além da determinação padrão do teor de umidade, utilizou-se, ainda, o Medidor Universal de Umidade portátil, durante os processos de secagem das sementes de soja.

-Medição da germinação:

Na determinação do teste de germinação do produto deteriorável - semente de soja - utilizou-se um germinador, água destilada e papel de germinação de pH neutro.

-Medição do teste de vigor:

Na determinação do vigor de sementes a danos mecânicos, utilizou-se uma estufa, folhas de papel toalha germiteste de pH neutro, água destilada e germinador.

4.1.6 Produtos perecível e deteriorável:

Para o estudo de casos foram utilizados um produto perecível - tomate cereja (Planta hortícola da família das *Solanáceas*, ***Lycopersicum esculentum Mill.***, variedade F₁ híbrido SWEET MILLION) e um produto deteriorável - semente de soja (Planta da família das *Leguminosas*, subfamília da *Papilionácea*, ***Glycine max.***, variedade FOSCARIN).

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Introdução

Observa-se que, com a utilização de um sistema gerador de condicionamento de ar, é possível estudar a preservação da maioria dos produtos agrícolas, quer eles sejam perecíveis ou deterioráveis; uma vez que este sistema é capaz de gerar condições psicrométricas bem amplas ($T = 0$ a 100 °C e UR = 10 a 100%). Inicialmente, todavia, somente um produto de cada categoria (perecível e deteriorável) foi analisado na câmara de testes, definido de acordo com sua importância comercial e disponibilidade sazonal, pois o objetivo principal devia ser mantido, isto é, a avaliação da metodologia da 2ª Lei da Termodinâmica na eficiência do sistema gerador de processos psicrométricos.

As condições iniciais e finais de cada processo psicrométrico foi determinada através da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, segundo cada caso. Obviamente, que outros parâmetros foram necessários para a avaliação dos processos em seus respectivos sistemas, tais como: pressão (barométrica e/ou absoluta), vazões ou fluxos mássicos, consumo de energia elétrica, poder calorífico, entre outros. As propriedades termodinâmicas indiretas (entalpia, entropia, densidade, etc) da água e do ar, em seus diferentes estados, foram obtidas através de equações consagradas, extraídas da literatura pertinente (ASAE-D271.2-86; ASHRAE - Fundamentals, 81; REYNOLDS, 1979; WELTY et al., 1976 e PARKER et al., 1974), que se encontram nos anexos correspondentes.

A fase experimental, após testes preliminares e de aferição dos equipamentos e instrumental DOEBELIN (1983), foi dividida em duas etapas distintas, sendo a primeira caracterizada pela geração dos diversos processos psicrométricos e sua avaliação energética e exergética. Enquanto que, a segunda etapa foi realizada, como estudo de casos, utilizando o produto perecível - tomate - no qual aplicou-se os processos psicrométricos de resfriamento direto, resfriamento por água gelada e resfriamento evaporativo; e para o produto deteriorável - sementes de soja - utilizou-se dos processos psicrométricos de aquecimento do ar por resistências elétricas e resfriamento direto.

4.2.2 Processos psicrométricos

Dos processos psicrométricos realizados, na primeira etapa, pelo equipamento construído, utilizou-se da sequência, abaixo descrita, para se efetuar as análises termodinâmicas:

4.2.2.1 Aquecimento do ar por resistência elétrica

Iniciou-se pelo aquecimento do ar através da ligação de conjuntos distintos de resistências elétricas (616, 1518 e 1672 W). Neste procedimento monitorou-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, do ar após o sistema de ventilação e do ar após as câmaras de produtos deterioráveis, temperatura de bulbo seco do ar na entrada das câmaras de produtos deterioráveis (1, 2 e 3), temperaturas de contato em cada um dos conjuntos de resistências elétricas, temperatura de bulbo seco do ar na câmara de aquecimento, temperatura de contato da superfície externa da câmara de aquecimento, velocidade do ar e potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação e através de cada conjunto de resistências elétricas em funcionamento.

Neste experimento variou-se a velocidade do ar de sucção nos seguintes patamares: 0,1; 0,25; 0,35; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00 e 3,50 m/s, sendo que o ar externo era succionado através da câmara de resfriamento de produtos perecíveis, circulado pelo sistema de dutos posteriores, passava pelo conjunto de resistências elétricas, percorria o duto inferior das câmaras de produtos deterioráveis e, saía, para o ambiente externo, pela parte superior da última câmara de produtos deterioráveis.

Com as velocidades de 0,1 a 1,5 m/s operou-se, somente, com o primeiro conjunto de resistências (616 W); de 2,0 a 3,0 m/s acionou-se o segundo conjunto de resistências (1672 W) e, finalmente, com a velocidade de 3,5 m/s utilizaram-se todos os conjuntos de resistências elétricas.

As medidas de todas as temperaturas foram monitoradas e armazenadas em intervalos de 10 segundos, enquanto que os outros parâmetros, acima citados, eram registrados a cada mudança de velocidade do ar, o que ocorria em intervalos de 15 minutos, aproximadamente.

Os valores lidos, a cada segundo, através do sistema de aquisição de dados, eram analisados e, somente os valores médios de 10 em 10 segundos foram armazenados, a fim de evitar valores extremos indesejáveis.

De posse dos dados efetuou-se a análise energética e exergetica do equipamento e respectivo processo psicrométrico, através do seguinte procedimento.

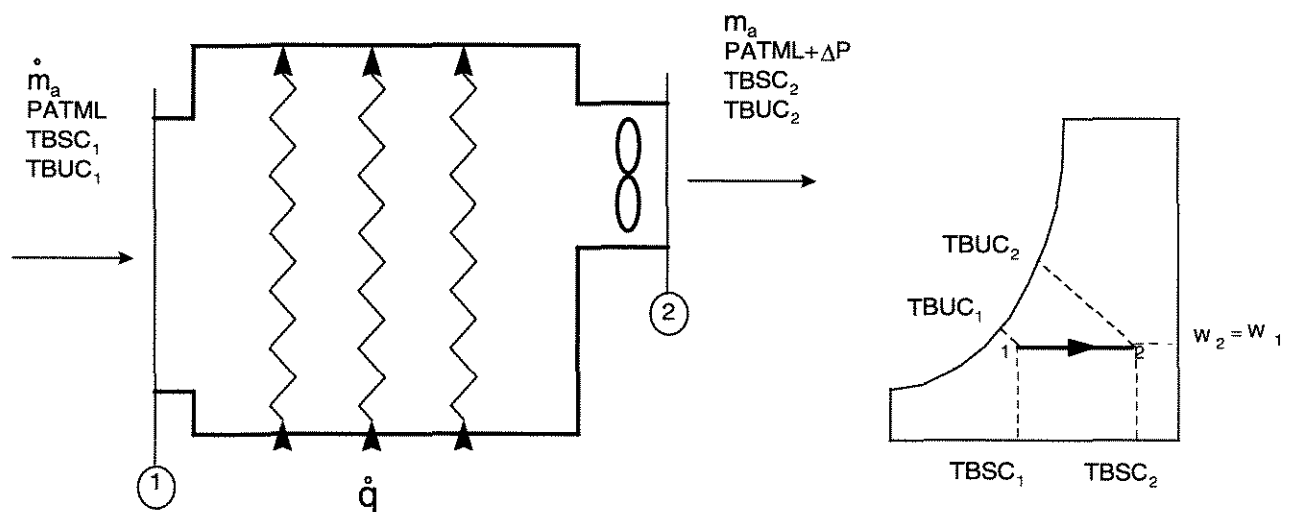


Figura 4.2.2.1. Esquema simplificado do processo de aquecimento do ar por resistência elétrica e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.

O balanço de energia do processo de aquecimento do ar, por resistências elétricas, pode ser representado pela seguinte equação:

$${}_1\dot{q}_2 + \dot{m}_a (h_{a1} + W_1 h_{v1}) = \dot{m}_a (h_{a2} + W_2 h_{v2}) \quad 161$$

onde,

\dot{m}_a = fluxo mássico de ar seco de entrada e saída, kga/s

h_{a1} = entalpia do ar seco no ponto 1, kJ/kg

W_1 = umidade absoluta do ar no ponto 1, kgv/kg

h_{v1} = entalpia do vapor de água, contido no ar, no ponto 1, kJ/kgv

q_{12} = energia calorífica fornecido ao ar pelas resistências elétricas, kJ/s

h_{a2} = entalpia do ar seco no ponto 2, kJ/kg

W_2 = umidade absoluta do ar no ponto 2, kgv/kg

h_{v2} = entalpia do vapor de água, contido no ar, no ponto 2, kJ/kgv

Como é um processo que, teoricamente, ocorre sem a variação da umidade absoluta, o balanço de massa pode ser definido pela seguinte formulação:

$$W_1 = W_2 \quad 162$$

então,

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad 163$$

A eficiência energética (ε), adimensional, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_a [(h_{a2} + W_2 h_{v2}) - (h_{a1} + W_1 h_{v1})]}{P.E_{RAR}} \quad 164$$

ou

$$\varepsilon = \frac{{}_1\dot{q}_2}{P.E_{RAR}} \quad 165$$

onde

$P.E_{RAR}$ = potência elétrica requerida pelas resistências do ar, W.

Na análise exérgica, o balanço de exergia, no processo de aquecimento do ar por resistência elétrica, pode ser representado pela seguinte equação:

$$\dot{Ex}_2 = \dot{Ex}_1 + \dot{Ex}_q - \dot{I} \quad 166$$

onde:

\dot{Ex}_2 = fluxo exérgico do ar no ponto 2, kJ/s

\dot{Ex}_1 = fluxo exérgico do ar no ponto 1, kJ/s

$\dot{E}x_Q$ = fluxo exergetico fornecido pela fonte de calor, kJ/s

\dot{I} = irreversibilidades ocorridas durante o processo devido a perdas por transferência de calor e por fluxo com atrito, kJ/s.

Uma questão fundamental, com respeito ao balanço exergetico do sistema e das variáveis associadas ao referido processo que nele se desenvolve (trabalho, calor, entropia gerada, exergia destruída, etc.), é a definição dos limites do volume de controle, que representa o sistema na análise termodinâmica a ser realizada. Isto é importante, porque todas as variáveis mencionadas, anteriormente, podem modificar seus valores ao se mudar os limites do volume de controle. Em particular, a entropia e a exergia destruída reconhecem, exclusivamente, os efeitos daqueles processos irreversíveis que ocorrem no interior do volume de controle selecionado.

Pode-se definir a irreversibilidade total como sendo a soma das irreversibilidades internas (exergia destruída) e externas (exergia perdida).

A exergia destruída (Ex_d) é calculada através da lei de Gouy-Stodola, como sendo:

$$\dot{E}x_d = T_0 \dot{S}_{ger} \geq 0$$

167

onde:

$\dot{E}x_d$ = exergia destruída, causa das irreversibilidades internas do processo, desenvolvido no volume de controle definido.

A exergia perdida, que está associada as irreversibilidades externas do processo, sendo parte do processo global analisado, se desenvolve fora do volume de controle selecionado para a análise termodinâmica. Por outro lado, nota-se que as perdas de exergia se devem ao fato de existirem fluxos que, contendo exergia, não têm ou não lhes dão uma utilidade posterior, para que esta mesma exergia seja aproveitada.

De acordo com a revisão bibliográfica viu-se que para que um sistema tenha exergia é porque deve estar em desequilíbrio com o ambiente que o rodeia. Portanto, o vapor, o ar quente ou frio, o gelo e o ar comprimido estão em desequilíbrio com o meio circunvizinho. Viu-se, também, que quanto mais controlado está um determinado processo, menos irreversível ele é e, por conseguinte, menos exergia pode ser destruída. Todavia, para que um sistema se encontre em estado de equilíbrio são necessárias três condições: equilíbrio mecânico, equilíbrio térmico e equilíbrio químico. Estas três condições impoem três tipos de processos irreversíveis, a saber:

Irreversibilidade mecânica, que é devido ao desequilíbrio da variável mecânica do sistema: sua pressão; tal desequilíbrio mecânico aparece quando se tem processos com fluxos sofrendo fricção e atrito.

Irreversibilidade térmica, que é devido a uma diferença finita de temperatura. Pois o calor é transferido, espontaneamente, dos corpos de temperatura mais alta para os corpos de temperatura mais baixa, perdendo parte da exergia contida. Obviamente que, quanto maior é esta diferença finita de temperatura maior será a entropia gerada e, portanto, mais exergia será destruída.

Irreversibilidade química, que é devido a um desequilíbrio químico, tais como os processos de mistura, separação e reações químicas.

Para se determinar a exergia total do ar (Ex_1 e Ex_2) da equação 166 é necessário aplicar a equação abaixo. Tal formula foi tratada por SZARGUT et al. (1969) e WEPFER et al. (1979), sendo sumarizada por MORAN (1982), desprezando-se os efeitos da energia cinética e potencial.

$$\begin{aligned} \dot{Ex}_2 = & \left(c_{pa2} + W_2 c_{pv2} \right) T_0 \left(\frac{T_2}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_2}{T_0} \right) + (1 + \tilde{w}_2) R_a T_0 \ln \frac{P_2}{P_0} + \\ & + R_a T_0 \left[(1 + \tilde{w}_2) \ln \frac{1 + \tilde{w}_0}{1 + \tilde{w}_2} + \tilde{w}_2 \ln \frac{\tilde{w}_2}{\tilde{w}_0} \right] \end{aligned} \quad 168$$

onde:

- $\dot{Ex}_2 =$ fluxo exergético total, por kilograma de ar seco no ponto 2, kJ/s.kg
 $c_{pa2} =$ calor específico do ar seco no ponto 2, kJ/kg.K
 $c_{pv2} =$ calor específico do vapor de água, contido no ar, no ponto 2, kJ/kgv.K
 $T_0=T_1 =$ temperatura absoluta do ar no estado inicial, K
 $T_2 =$ temperatura absoluta do ar no estado final, K
 $\ln =$ logaritmo na base neperiana,
 $\tilde{w}_2 =$ umidade absoluta do ar no ponto 2, em moles de vapor de água /1 mol de ar seco,
 $R_a =$ constante do ar seco, kJ/kg.K
 $P_1=P_0 =$ pressão atmosférica local, na entrada do volume de controle, kPa
 $P_2 =$ pressão na saída do volume de controle, kPa.
 $\tilde{w}_0 = \tilde{w}_1 =$ umidade absoluta do ar no estado inicial 1, em moles de vapor de água / mol de ar seco,

Em função das definições acima, a equação anterior pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \dot{Ex}_2 = & \left(c_{pa2} + W_2 c_{pv2} \right) T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 - \ln \frac{T_2}{T_1} \right) + (1 + \tilde{w}_2) R_a T_1 \ln \frac{P_2}{P_1} + \\ & + R_a T_1 \left[(1 + \tilde{w}_2) \ln \frac{1 + \tilde{w}_1}{1 + \tilde{w}_2} + \tilde{w}_2 \ln \frac{\tilde{w}_2}{\tilde{w}_1} \right] \end{aligned} \quad 168'$$

No caso particular de um fluxo total de ar seco a equação 168' pode ser simplificada, fazendo-se $W_2 = 0$ e $\tilde{w}_2 = 0$; então é possível demonstrar, imediatamente, que:

$$\dot{E}x_{as} = c_{pa} T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} + R_a T_0 \ln(1 + \tilde{w}_0) \quad 169$$

onde:

$\dot{E}x_{as}$ = fluxo exergetico total de um ar seco, kJ/kg_a.

Já o fluxo exergetico do ar no estado inicial (1), $\dot{E}x_1$, é igual a zero, pois o estado inicial (1) coincide com o estado de referência (0), portanto,

$$\dot{E}x_1 = 0 \quad 170$$

O fluxo exergetico devido a potência calorífica pode ser equacionada como sendo:

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_1}{T_{RAR}} \right) \dot{Q}_{RAR} \quad 171$$

onde:

T_{RAR} = temperatura absoluta das resistências elétricas, K

\dot{Q}_{RAR} = fluxo calorífico fornecido pelas resistências, na temperatura T_{RAR} , kJ/s

Segundo VALERO & LOZANO (1994), em processos psicrométricos, principalmente, de secagem e condicionamento de ar é conveniente trabalhar com um ambiente de referência específico para cada situação e, supondo, agora, que se conheça a pressão, temperatura e composição (p, t, w) de um fluxo de ar úmido, a entalpia e exergia podem ser calculadas, em kJ/kg, de ar seco, empregando as seguintes expressões aproximadas:

$$h_{au} \cong c_{pa} (1 + 1,805w)(T - 273,15) + 2500w \approx c_{pa} (1 + 1,805w)t + 2500w \quad 172$$

e

$$\begin{aligned} Ex_{au} = & c_{pa} T_0 (1 + 1,805w) \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + 0,287(1 + 1,608w) \ln \frac{P}{P_0} + \\ & + 0,287 \ln \left[\left(\frac{1 + 1,608w_0}{1 + 1,608w} \right)^{(1 + 1,608w)} \left(\frac{w}{w_0} \right)^{1,608w} \right] \end{aligned} \quad 173$$

As irreversibilidades I, geradas pelo equipamento, neste processo podem ser definidas aqui, utilizando-se do desenvolvimento realizado por BEJAN (1979, 1980 e 1982) e apresentado de maneira sucinta no capítulo anterior, como sendo a exergia destruída (irreversibilidades internas).

Neste trabalho, a Irreversibilidade (I) foi determinada como sendo a incógnita das equações dos balanços exergéticos. Portanto, para este processo, a irreversibilidade I foi calculada através da equação 166, isto é;

$$\dot{I} = (\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2) - \dot{E}x_3 \quad 174$$

Conforme mencionado anteriormente, a eficiência exergética (η) não tem uma única forma de ser expressa e, portanto, neste trabalho foi analisado duas formas, a saber, a tradicional (η_T) e a eficiência racional de Kotas (η_K), que estão definidas conforme descrito abaixo:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2} \quad 175$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_2} \quad 176$$

4.2.2.2 Aquecimento e umidificação do ar

O segundo processo psicrométrico analisado foi o aquecimento e umidificação do ar através de sua passagem pela primeira câmara de condicionamento, sob os aspersores, que expeliam água aquecida na base da câmara pelas resistências blindadas do tipo arco.

Neste experimento a vazão de água foi mantida constante em 52,2 l/h, enquanto variava-se o fluxo de ar e a temperatura da água.

O percurso adotado neste processo foi realizado com a sucção do ar externo feita através da abertura de 150 mm na tampa da primeira câmara de condicionamento do ar, passando pela segunda câmara de condicionamento, atravessando o plenum de ventilação, percorrendo o duto inferior das câmaras de produtos deterioráveis, atravessando a última destas câmaras e, finalmente, saindo pela parte superior da mesma.

As resistências elétricas blindadas (376, 133 e 1290 W), medidas neste instante, e as velocidades de ar (0,25; 0,5; 0,75; 1,0 e 1,5 m/s) foram acionadas individualmente a cada 30 minutos e os parâmetros monitorados e armazenados , a cada 10 segundos, foram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, as temperaturas de bulbo seco e úmido antes e após o plenum de ventilação e na saída do

sistema; temperatura de bulbo seco no plenum de ventilação, nas entradas de cada câmara de produtos deterioráveis, temperatura da água na base da câmara de condicionamento e na saída do último aspersor, temperatura de contato externo nas tubulações de entrada e saída da câmara. Além destes parâmetros, foram medidos, a cada 30 minutos, as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação, pela bomba hidráulica e pelas resistências elétricas submersas na água.

Com a velocidade do ar em 0,25 m/s ligou-se, a cada meia hora, uma resistência elétrica e, a partir daí, variou-se apenas a velocidade do ar até 1,5 m/s.

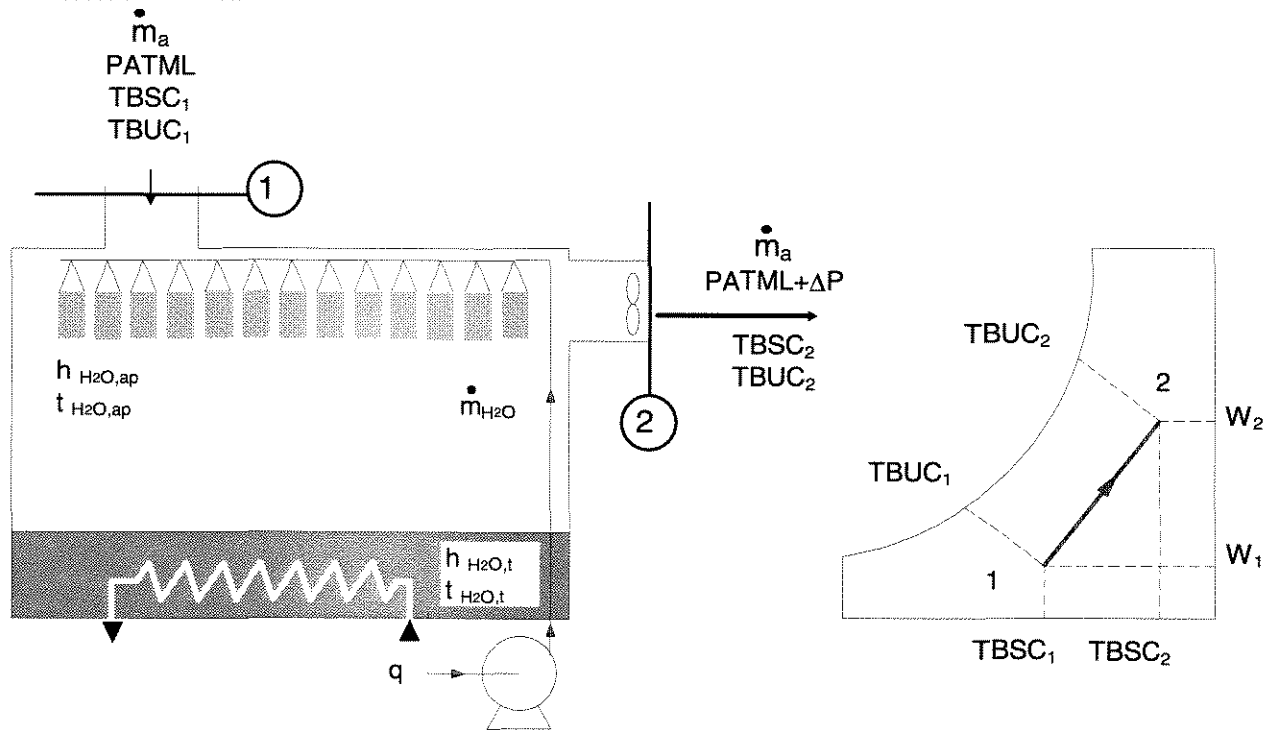


Figura 4.2.2.2. Esquema do processo de aquecimento e umidificação e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.

Com os dados obtidos efetuou-se a avaliação energética e exergética do respectivo processo, baseando-se na seguinte formulação.

O balanço energético de aquecimento e umidificação do ar através da água quente pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\dot{m}_{a1}(h_{a1} + W_1 h_{v1}) + \dot{m}_{H_2O}(h_{H_2O,ap}) = \dot{m}_{a2}(h_{a2} + W_2 h_{v2}) \quad 177$$

onde, dos termos não definidos anteriormente, tem-se:

$$\dot{m}_{H_2O} = \text{fluxo mássico de água, kg}_{H_2O}/s$$

$$h_{H_2O,ap} = \text{entalpia da água líquida na saída dos aspersores, kJ/kg}_{H_2O}$$

O balanço de massa de vapor de água neste processo, sabendo-se que a massa de ar seco não varia entre os estados 1 e 2, isto é, $\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2}$, é definido como sendo:

$$\dot{m}_{a1} W_1 + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{a2} W_2 \quad 178$$

ou

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_a (W_2 - W_1) \quad 179$$

Aplicando-se o balanço de massa, equação 179, no balanço de energia, equação 177 e, rearranjando, obtém-se a variação de energia fornecida ao ar pela água (q'). Portanto,

$$q' = \frac{h_2 - h_1}{W_2 - W_1} = h_{H_2O,ap} \quad 180$$

onde:

$h_2 = h_{a2} + W_2 h_{v2}$ = entalpia do ar úmido no ponto 2, kJ/kg

$h_1 = h_{a1} + W_1 h_{v1}$ = entalpia do ar úmido, no ponto 1, kJ/kg

A eficiência energética (ε) seria, então dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{q}{PE_{RAG} + PE_{BH}} \quad 181$$

onde,

PE_{RAG} = potência elétrica fornecida para as resistências elétricas da água, W.

PE_{BH} = potência elétrica fornecida ao sistema moto-bomba-aspersores, W.

BEJAN (1988) e RODRIGUEZ (1988) calculam as propriedades termodinâmicas (entalpia e exergia) da água líquida ($h_{H_2O,l}$ e $Ex_{H_2O,l}$), respectivamente; para diversos processos que envolvem misturas de ar e vapor de água, onde um ou mais fluxos transportam água condensada (por ex.: saturador adiabático ou água de condensação saindo de um desumidificador de ar), pois o fluxo exergético total da água líquida não pode ser deduzido como um caso particular da equação 168', como foi feito para um fluxo exergético total de um ar seco na equação 169, devido ao fato da água líquida não obedecer ao modelo de gás ideal; da seguinte maneira:

$$h_{H_2O,l}(T, P) \cong h_{H_2O,ls}(T) + v_{H_2O,ls}(T) [P - P_{H_2O,ls}(T)] \quad 182$$

$$h_{H_2O,l} \cong h_{H_2O,ls}(T) + v_{H_2O,ls}(T) [P - P_{H_2O,v}(T)] \approx 4,186(T - 273,15) \cong 4,186t \quad 182'$$

e

$$Ex_{H_2O,l} \cong h_{H_2O,ls}(T) - h_{H_2O,vs}(T_0) - T_0 [s_{H_2O,ls}(T) - s_{H_2O,vs}(T_0)] + \\ + v_{H_2O,ls}(T) * [P - P_{H_2O,s}(T)] - R_{H_2O,v} T_0 \ln \phi_0 \quad 183$$

$$Ex_{H_2O,l} = h_{H_2O,ls}(T) - h_{H_2O,vs}(T_0) - T_0 [s_{H_2O,ls}(T) - s_{H_2O,vs}(T_0)] + \\ + v_{H_2O,ls}(T) * [P - P_{H_2O,v}(T)] - R_{H_2O,v} T_0 \ln \phi_0 \quad 183'$$

onde:

- $h_{H_2O,ls}$ = entalpia da água, no estado de líquido saturado, kJ/kg
 $h_{H_2O,vs}$ = entalpia da água, no estado de vapor saturado, kJ/kg
 $s_{H_2O,ls}$ = entropia da água, no estado de líquido saturado, kJ/kg. K
 $s_{H_2O,vs}$ = entropia da água, no estado de vapor saturado, kJ/kg. K
 $v_{H_2O,ls}$ = volume específico da água, no estado de líquido saturado, m³/kg.
 P = pressão atmosférica local, no volume de controle, kPa
 $P_{H_2O,v}$ = pressão do vapor de água local, kPa
 $P_{H_2O,s}$ = pressão de saturação do vapor de água, kPa
 ϕ_0 = umidade relativa local
 T, T_0 = temperatura absoluta do ar úmido, K.

A umidade relativa local (ϕ_0) pode ser calculada através de:

$$\phi_0 = \frac{1,608 w_0}{1 + 1,608 w_0} \frac{P}{P_{H_2O,s}(T_0)} \quad 184$$

para $0 < \phi_0 < 1$.

Segundo RODRIGUEZ (1988), em casos onde a água líquida se encontra na mesma temperatura que o ambiente e a pressões moderadas, a exergia desta ($Ex_{H_2O,l}$) pode ser aproximada por:

$$Ex_{H_2O,l} \approx -0,461 T_0 \ln \phi_0 \quad 185$$

Na análise de 2^a lei, o balanço exergetico se dá na seguinte forma,

$$\dot{Ex}_2 = \dot{Ex}_1 + \dot{Ex}_{H_2O} - \dot{I} \quad 186$$

sendo que, dos termos ainda não definidos, temos

$\dot{E}x_{H_2O}$ = fluxo exergético da água, kJ/s; que pode ser calculado segundo as equações 183, 183' ou 185, ou ainda ser definido como se segue,

$$\dot{E}x_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \left[h_{H_2O,ap} (T_{ap}, P) - T_1 S_{H_2O,ap} (T_{ap}, P) \right] \quad 187$$

onde:

$S_{H_2O,ap}$ = entropia da água na saída do aspersor, kJ/kg.K

$S_{H_2O,t}$ = entropia da água na base do tanque, kJ/kg.K

Na presente análise, a exergia da água foi considerada como sendo a quantidade de energia fornecida ao conjunto moto-bomba-aspersores e ao sistema de aquecimento da água, isto é, $Ex_{H_2O} = Ex_{PECBH} + Ex_{PECRAG}$.

A eficiência exergética (η) é, portanto, obtida da forma tradicional (η_T) e pela definição de Kotas (η_K), através das seguintes equações:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{H_2O}} \quad 188$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_{H_2O}} \quad 189$$

4.2.2.3 Umidificação e aquecimento do ar

O terceiro e último processo de geração de aquecimento realizado pelo **SIGEP** foi o experimento sobre umidificação e aquecimento do ar, onde o ar externo era succionado através da abertura circular, com diâmetro de 150 mm, na tampa superior da primeira câmara de condicionamento, percorria, sob os aspersores, o caminho sinuoso promovido pelas placas defletoras; entrando na 2^a câmara de condicionamento, onde se encontravam as resistências elétricas que realizavam o aquecimento do ar; atravessava o plenum de ventilação, onde o ar era propulsionado para o circuito dos dutos inferiores; passando pela parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis e saía, finalmente, para o ambiente externo pela abertura superior que se encontrava sobre a 3^a câmara de produtos deterioráveis.

Neste experimento a vazão de água foi mantida constante no seu valor máximo, isto é, 52,2 l/h; enquanto variava-se o fluxo de ar e as temperaturas de aquecimento do ar, via ligação de diferentes conjuntos de resistências elétricas.

As velocidades do ar variaram de 0,25 m/s até 1,50 m/s, com incrementos de 0,25 m/s e, a variação individual do conjunto de resistências elétricas de 600 W a 1700 W.

A cada hora as velocidades do ar eram aumentadas em 0,25 m/s enquanto que as resistências de 1700 W só foram acionadas a partir da velocidade de 0,75 m/s. Ao

atingir este patamar de velocidade, o tempo entre cada mudança reduziu-se pela metade, em função da alta temperatura atingida nas câmaras de produtos.

Os parâmetros medidos e registrados inicialmente a cada 30 minutos e, a partir da velocidade de 0,75 m/s, a cada 15 minutos foram as potências consumidas pelo sistema de ventilação, pela bomba hidráulica e pelo conjunto de resistências elétricas.

A cada 15 segundos eram monitorados e armazenados os valores médios das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, do ar após a umidificação, do ar após a ventilação e do ar de saída; as temperaturas de bulbo seco do ar na 2ª câmara de condicionamento e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; a temperatura da água na base da 1ª câmara de condicionamento e na saída do último aspersor; as temperaturas de contato externo na tubulação hidráulica de entrada na câmara de condicionamento, na tubulação de saída inferior ao tanque, na tubulação de entrada da bomba hidráulica, no conjunto de resistências elétricas e no lado externo do isolamento da 2ª câmara de condicionamento do ar.

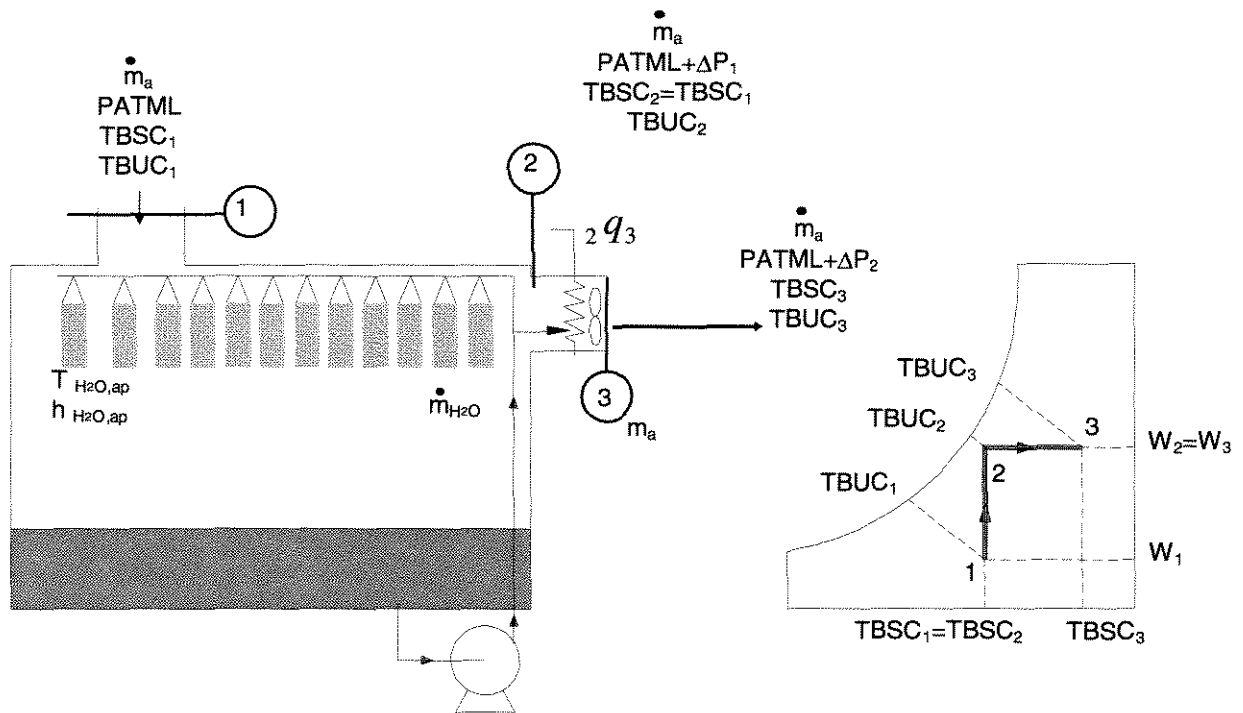


Figura 4.2.2.3. Esquema do processo de umidificação e aquecimento e esboço do diagrama psicrométrico entre o estado inicial e final.

Com os dados obtidos realizou-se a avaliação energética e exérgica do referido processo baseado na seguinte formulação.

O balanço de energia do referido processo pode ser definido pela expressão que se segue:

$$\dot{m}_{a,1}(h_{a,1} + W_1 h_{v,1}) + \dot{m}_{H_2O}(h_{H_2O,ap}) + {}_2\dot{q}_3 = \dot{m}_{a,3}(h_{a,3} + W_3 h_{v,3}) \quad 190$$

O balanço de massa de vapor de água, sabendo-se que $\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,3} = \dot{m}_a$, pode ser definido como sendo igual a:

$$\dot{m}_{a,1}W_1 + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{a,3}W_3 \quad 191$$

ou

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_a(W_3 - W_1) \quad 191'$$

Aplicando-se o balanço de massa, equação 144', no balanço de energia, equação 143 e, reformulando tal equação, obteve-se a variação de energia fornecida ao ar de entrada, da seguinte maneira,

$$\dot{q}' = \frac{h_3 - h_1}{W_3 - W_1} = \frac{{}_2\dot{q}_3}{\dot{m}_{H_2O}} + h_{H_2O,ap} \quad 192$$

A eficiência energética (ε) é, então, fornecida pela seguinte razão:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}'}{PE_{RAR} + PE_{B.H}} \quad 193$$

Na análise feita utilizando os conceitos combinados da 1ª e 2ª leis da Termodinâmica, o balanço exergético pode ser atribuído como sendo o que se segue,

$$\dot{Ex}_2 = \dot{Ex}_1 + \dot{Ex}_Q + \dot{Ex}_{H_2O} - \dot{I} \quad 194$$

A eficiência exergética (η) portanto, obtida da forma tradicional (η_T) e da forma proposta por KOTAS, pode ser demonstrada pelas equações abaixo:

$$\eta_T = \frac{\dot{Ex}_2}{\dot{Ex}_1 + \dot{Ex}_Q + \dot{Ex}_{H_2O}} \quad 195$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{Ex}_2 - \dot{Ex}_1}{\dot{Ex}_Q + \dot{Ex}_{H_2O}} \quad 196$$

onde, também, neste caso a $Ex_{H_2O} = Ex_{PECBH}$ e $Ex_Q = Ex_{PECRAR}$.

4.2.2.4 Resfriamento e desumidificação do ar

Dos processos psicrométricos de resfriamento do ar, o primeiro avaliado no **SIGEP** foi o processo de resfriamento e desumidificação do ar por contato direto com o evaporador aletado, situado na câmara de condicionamento 3.

Neste processo o ar externo era succionado pela abertura de 150 mm na parte superior da câmara do evaporador sendo forçado através deste, passava pela câmara de condicionamento de produtos perecíveis, atravessava o duto de circulação posterior, entrando pelo plenum de ventilação, percorria a parte inferior do duto de circulação frontal, sob as câmaras de produtos deterioráveis e saía pela parte superior da última das câmaras citadas.

Os parâmetros monitorados e armazenados foram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, da saída da câmara de condicionamento de produtos perecíveis, após o sistema de ventilação e na saída superior da 3ª câmara de produtos deterioráveis; as temperaturas de bulbo seco do ar no plenum de ventilação e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; temperatura da água de condensação; temperaturas de contato externo da válvula de expansão, da tubulação de entrada e saída do evaporador, da tubulação de sucção e descarga do compressor e, da saída da tubulação do tanque de refrigerante.

Além dos parâmetros acima citados, que foram monitorados e armazenados a cada 10 segundos, foram registrados, também, a variação da velocidade do ar (0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25 e 1,50 m/s), as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação e refrigeração, as pressões e temperaturas de alta e baixa do sistema de refrigeração a cada 20 minutos e, o volume de água condensada do evaporador na metade e no final do experimento.

O processo de resfriamento do ar por expansão direta apresenta o equacionamento do balanço energético da seguinte forma:

$$\dot{m}_{a,1} (h_{a1} + W_1 h_{v,1}) = \dot{m}_{a,2} (h_{a2} + W_2 h_{v,2}) + {}_1\dot{q}_2 + \dot{m}_{H_2O,c} h_{H_2O,c} \quad 197$$

ou

$${}_1\dot{q}_2 = \dot{m}_a (h_1 - h_2) - \dot{m}_{H_2O,c} h_{H_2O,c} \quad 197'$$

onde:

$h_{H_2O,c}$ = entalpia da água de condensação, kJ/kg

sendo o balanço de massa de ar seco igual a

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a \quad 198$$

O balanço de massa de vapor de água para esta situação pode ser descrito como :

$$\dot{m}_a W_1 = \dot{m}_a W_2 + \dot{m}_{H_2O,c} \quad 199$$

OU

$$\dot{m}_a (W_1 - W_2) = \dot{m}_{H_2O,c} \quad 199'$$

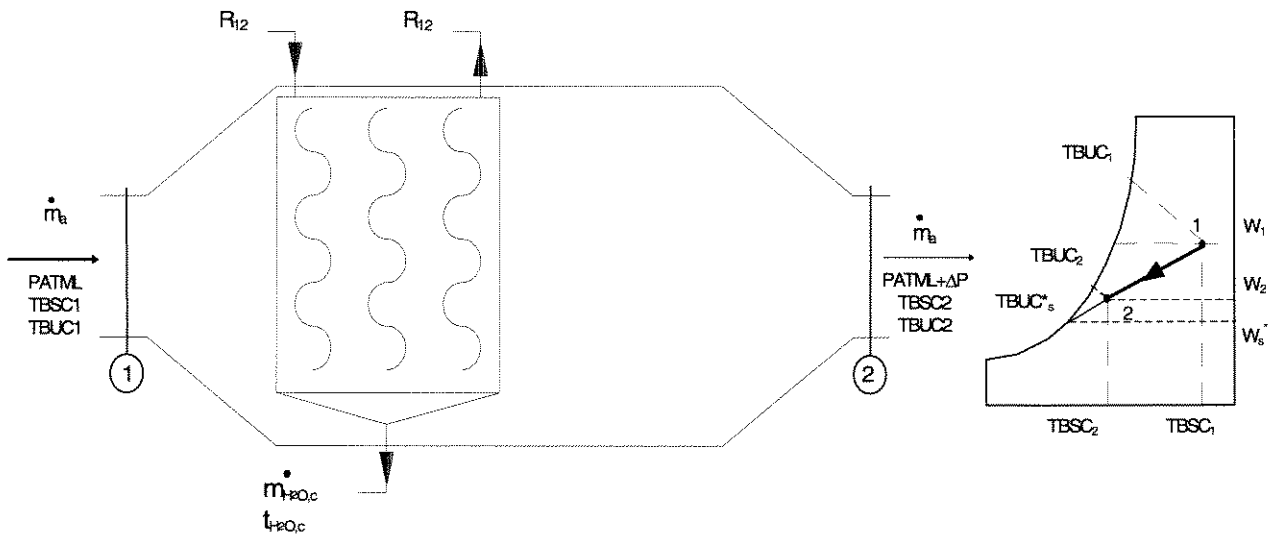


Figura 4.2.2.4. Esquema do processo de resfriamento por expansão direta e respectivo esboço do estado inicial e final na carta psicrométrica.

Combinando as equações 197' e 199' obtém-se o balanço energético do referido processo através da seguinte fórmula:

$${}_1q_2 = \dot{m}_a (h_1 - h_2) - \dot{m}_a (W_1 - W_2) h_{H_2O,c} \quad 200$$

Com base no princípio de 1ª Lei da Termodinâmica, a eficiência energética (ε) pode ser determinada através da equação abaixo,

$$\varepsilon = \frac{{}_1\dot{q}_2}{PE_{SR}} \quad 201$$

sendo,

PE_{SR} = potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração, W

No caso da avaliação exergetica tem-se que o balanço é fornecido pela seguinte expressão:

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{PECSR} - \dot{E}x_{H_2O} - \dot{I} \quad 202$$

sendo

$\dot{E}x_{H_2O}$ = fluxo exergetico da água de condensação, kJ/s

$\dot{E}x_{PECSR}$ = fluxo exergetico do sistema de refrigeração, kJ/s

que pode ser definido como mostrado abaixo,

$$\dot{E}x_{PECSR} = PE_{SR} / 1000 \quad 203$$

Baseado nas equações anteriores é possível definir a eficiência exergetica tradicional (η_T) e a racional de Kotas (η_K) através das seguintes equações:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O}}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{PECSR}} \quad 204$$

e

$$\eta_K = \frac{(\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O}) - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_{PECSR}} \quad 205$$

4.2.2.5 Resfriamento do ar por água gelada

O segundo processo psicrométrico de resfriamento analisado, foi o processo de resfriamento por água gelada.

Neste processo o ar externo era succionado pela abertura de 150 mm, na tampa da primeira câmara de condicionamento, passando sob a linha de aspersores que descarregava, a um fluxo constante, água gelada. O ar, ao percorrer o caminho sinuoso provocado pelas placas defletoras, adentrava no plenum de ventilação onde era propulsionado para o duto inferior das câmaras de produtos deterioráveis, saindo pela parte superior da terceira câmara supra citada.

Durante o referido processo variou-se a velocidade do ar de 0,25 a 1,50 m/s, com intervalos de 0,25 m/s a cada hora e, monitorou-se tal velocidade, as potências elétricas requeridas pelos sistemas de ventilação, refrigeração e bomba hidráulica a cada 30 minutos, assim como as pressões e temperaturas de alta e baixa do sistema de refrigeração.

Num intervalo de 10 segundos eram monitorados e armazenados as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, do ar na câmara de condicionamento, do ar após o sistema de ventilação e na saída após a terceira câmara de produtos deterioráveis. Registrava-se, ainda, as temperaturas de bulbo seco no plenum de ventilação e na parte inferior de cada câmara de produto deteriorável, assim

como as temperaturas da água na base do tanque e na saída do último aspersor e, as temperaturas de contato externo na válvula de expansão do evaporador, na tubulação de entrada e saída do evaporador, nas tubulações de sucção e descarga do compressor e na tubulação de saída do tanque de refrigerante.

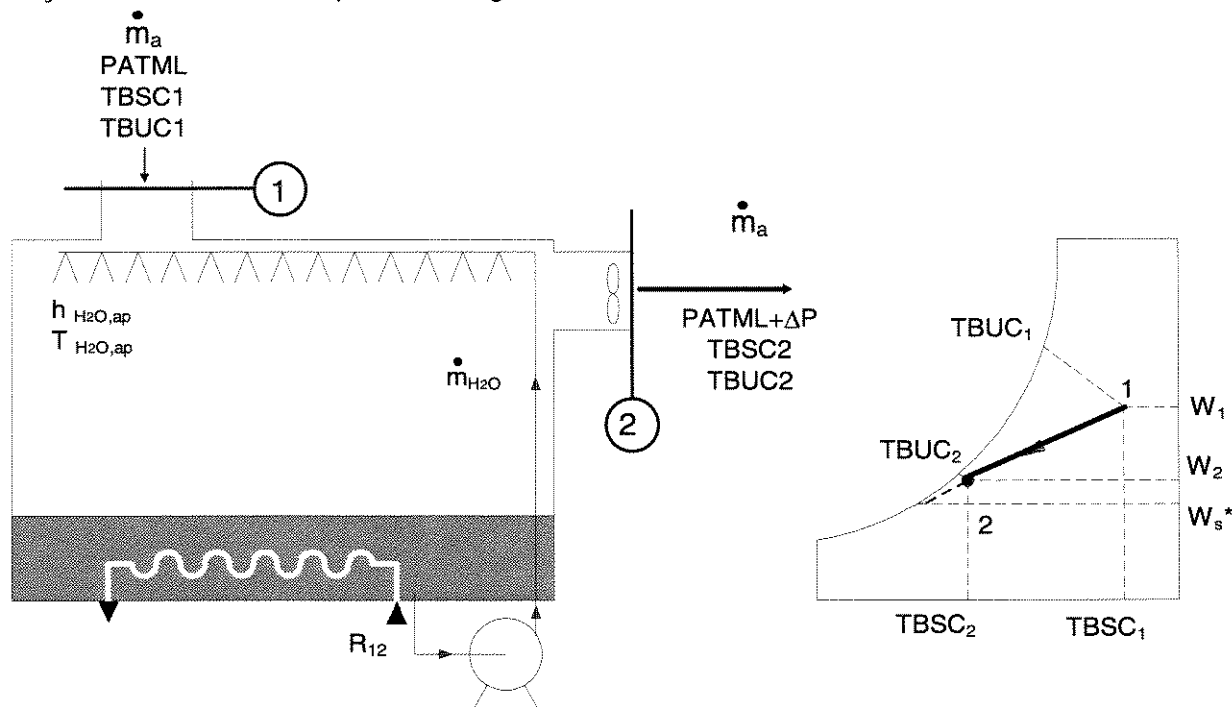


Figura 4.2.2.5. Esquema do processo de resfriamento do ar por água gelada e respectivo diagrama psicrométrico do estado inicial e final.

Para este processo descreve-se o balanço de energia através das seguintes expressões:

$$\dot{m}_a (h_1 + W_1 h_{v1}) = \dot{m} (h_2 + W_2 h_{v2}) + \dot{m}_{H_2O} (h_{H_2O,ap}) \quad 206$$

O balanço de massa do referido processo pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\dot{m}_a W_1 = \dot{m}_a W_2 + \dot{m}_{H_2O,ap} \quad 207$$

Combinando as equações de balanço de massa com a de balanço de energia, obtêm-se a variação de energia do processo de resfriamento por água gelada, demonstrada a seguir,

$$q' = \frac{h_1 - h_2}{W_1 - W_2} = h_{H_2O,ap} \quad 208$$

O que resulta numa eficiência de 1^a Lei igual a:

$$\varepsilon = \frac{q'}{(PECSR + PECBH)} \quad 209$$

Quanto a análise feita pela avaliação exergética, teria-se o seguinte balanço:

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{H_2O} - \dot{I} \quad 210$$

As eficiências exergéticas (η) pelo método tradicional (η_T) e pelo método de Kotas (η_K) podem ser expressas como sendo:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{H_2O}} \quad 211$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_{H_2O}} \quad 212$$

onde

$$\dot{E}x_{H_2O} = \dot{E}x_{PECSR} + \dot{E}x_{PECBH} \quad 213$$

4.2.2.6 Resfriamento evaporativo do ar

O último dos processos psicrométricos de resfriamento realizado pelo **SIGEP** foi o de resfriamento evaporativo do ar.

Nesta situação o caminho percorrido foi o mesmo do realizado no resfriamento do ar por água gelada.

Para este processo variou-se a velocidade do ar de 0,25 m/s até 1,5 m/s em intervalos de 0,25 m/s a cada hora. Registrou-se a velocidade do ar; as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação e da bomba hidráulica em intervalos de 30 minutos.

Os parâmetros monitorados e armazenados a cada 10 segundos foram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, do ar após o resfriamento evaporativo na primeira câmara de condicionamento, do ar após a ventoinha e do ar na saída superior da terceira câmara de produtos deterioráveis; as temperaturas de bulbo seco do ar no plenum de ventilação e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas da água na parte inferior do tanque e na saída do último aspersor e, as temperaturas de contato externo das tubulações hidráulicas de saída e entrada da câmara e da entrada da água no tanque, via rede externa.

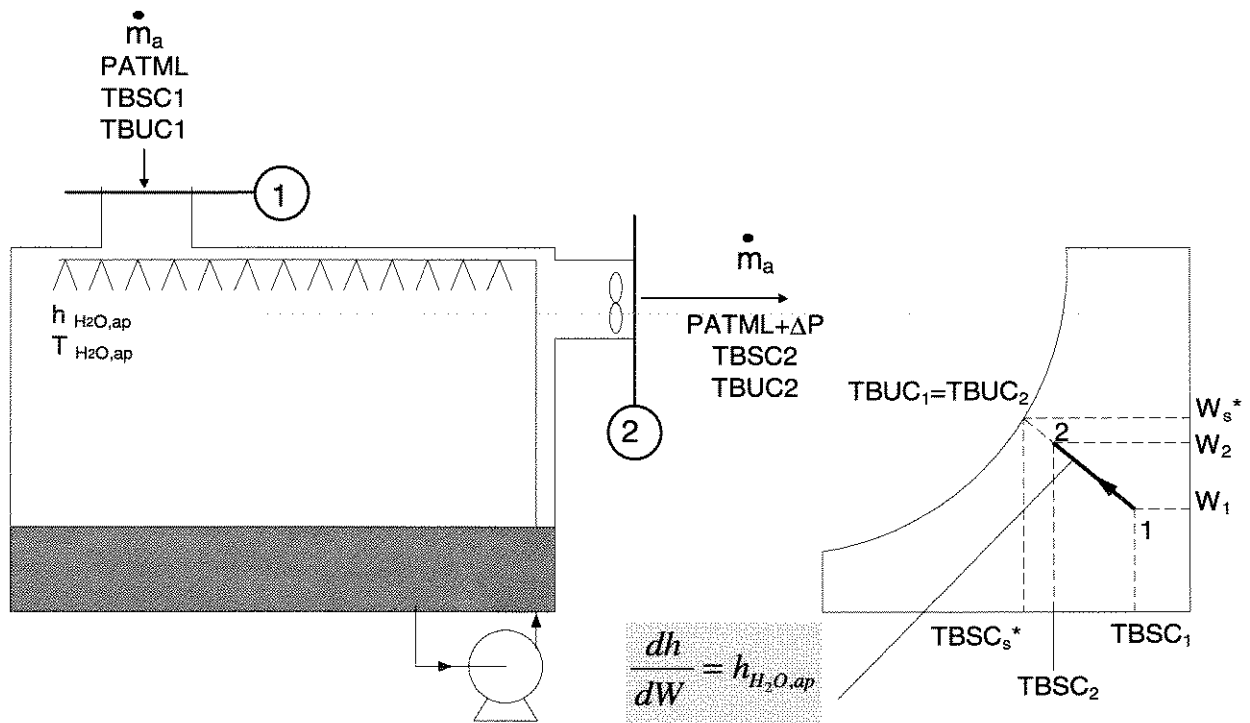


Figura 4.2.2.6. Esquema do processo de resfriamento evaporativo do ar e respectivo resultado em diagrama psicrométrico do estado inicial e final.

No processo de resfriamento evaporativo o balanço energético dos parâmetros envolvidos pode ser descrito pelas seguintes equações;

$$\dot{m}_{a1}(h_{a,1} + W_1 h_{v,1}) + \dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} = \dot{m}_{a2}(h_{a,2} + W_2 h_{v,2}) \quad 214$$

Sabendo-se que os fluxos mássicos de ar seco são iguais, na entrada e na saída, isto é:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad 215$$

e que o balanço de massa do vapor de água é expresso como sendo,

$$\dot{m}_{a1} W_1 + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{a2} W_2 \quad 216$$

Substituindo o balanço de massa do vapor de água no balanço de energia obtém-se

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (W_2 - W_1) h_{H_2O} = \dot{m}_a h_2 \quad 217$$

que resulta, finalmente, numa expressão do tipo

$$q' = \frac{h_2 - h_1}{W_2 - W_1} = h_{H_2O} \quad 218$$

Pode-se calcular a eficiência energética (ϵ), deste processo, mediante a seguinte formulação:

$$\epsilon = \frac{q'}{PE_{BH}} \quad 219$$

Uma maneira, todavia, tradicional de se expressar a eficiência do processo de resfriamento evaporativo, no meio agrícola, é através da eficiência psicrométrica, dada pela equação abaixo:

$$\epsilon_{PSI} = \frac{W_2 - W_1}{W_s^* - W_1} = \frac{T_{bs,1} - T_{bs,2}}{T_{bs,1} - T_{bs}^*} \quad 220$$

onde

ϵ_{PSI} = eficiência psicrométrica

W_s^* = umidade absoluta do ar saturado, kg_v/kg_a

$T_{bs,2}$ = temperatura absoluta de bulbo seco do ar, no ponto 2, K

$T_{bs,1}$ = temperatura absoluta de bulbo seco do ar, no ponto 1, K

$T_{bs} = T_{bu}$ = temperatura absoluta de bulbo seco do ar saturado = temperatura absoluta de bulbo úmido, K

Quanto a avaliação exergética do processo de resfriamento evaporativo, o balanço de exergia pode ser equacionado da seguinte forma,

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{H_2O} - \dot{I} \quad 221$$

As eficiências exergéticas (η), tanto pelo método tradicional (η_T) quanto pelo método de Kotas (η_K) podem, portanto, ser expressas como segue:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_{H_2O,ap} + \dot{E}x_1} \quad 222$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_{H_2O,ap}} \quad 223$$

onde:

$\dot{E}x_{H_2O.ap} = \dot{E}x_{PECBH}$ = fluxo de exergia da água, no estado líquido, na saída dos aspersores, equivalente a potência elétrica fornecida ao conjunto moto-bomba-aspersores, kJ/s.

4.2.2.7 Mistura adiabática de duas correntes de ar

O último processo psicrométrico realizado pelo SIGEP, nesta etapa experimental de avaliação do equipamento e processos foi o de mistura adiabática de duas correntes de ar.

Neste processo podem ocorrer duas situações distintas, a primeira onde a corrente de ar 2 é aquecida pela corrente de ar 1 e, a segunda é onde a corrente de ar 2 é resfriada pela corrente de ar 1.

Na primeira situação de mistura adiabática de duas correntes de ar, onde a corrente de ar 2 é aquecida pela corrente de ar 1, realizou-se o seguinte procedimento experimental.

O ar da corrente 1 era um ar externo que, entrando pela tampa da referida câmara, através da abertura circular de 150 mm de diâmetro, era umidificado e aquecido na primeira câmara de condicionamento e saía pela abertura quadrada de 215 mm, misturava-se com o ar externo 2, que entrava por uma abertura circular de 150mm de diâmetro, na face posterior do SIGEP, antes da câmara de condicionamento 2, sem tratamento ou condicionamento térmico nenhum, este terceiro ar (mistura da corrente 1 com a corrente 2) passava, então, pelo plenum de ventilação, percorria o circuito de duto anterior sob as três câmaras de produtos deterioráveis e saía, para o ambiente externo, pela parte superior da 3ª câmara.

Para este procedimento variou-se a velocidade do ar de 0,25 m/s até 1,50 m/s, com incrementos de 0,25 m/s, a cada hora.

Neste experimento monitorou-se a velocidade do ar, as potências elétricas requeridas pelos sistemas de ventilação, da bomba hidráulica e dos conjuntos de resistências elétricas tipo arco a cada 30 minutos; enquanto que as médias das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo, do ar após aquecimento e umidificação, do ar após a ventilação e na saída do ar para o ambiente externo; as temperaturas de bulbo seco do ar na 2ª câmara de condicionamento e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas da água na base inferior da primeira câmara e na saída do último aspersor; as temperaturas de contato externo das tubulações de entrada da água no tanque, de saída da água da câmara e de entrada da água na bomba eram monitoradas e armazenadas a cada 15 segundos.

Com os parâmetros obtidos houve a possibilidade de se realizar a avaliação energética e exérgica do referido processo através da representação gráfica e pela caracterização dos balanços apresentados a seguir:

$$\dot{m}_{a1} (h_{a,1} + W_1 h_{v,1}) + \dot{m}_{a2} (h_{a,2} + W_2 h_{v,2}) = \dot{m}_{a,3} (h_{a,3} + W_3 h_{v,3}) \quad 224$$

onde:

$\dot{m}_{a,3}$ = fluxo mássico do ar seco de mistura, kga/s

$h_{a,3}$ = entalpia do ar seco de mistura, J/kg

W_3 = umidade absoluta da mistura, kgv/kg

$h_{v,3}$ = entalpia do vapor de água, contida no ar de mistura, J/kgv

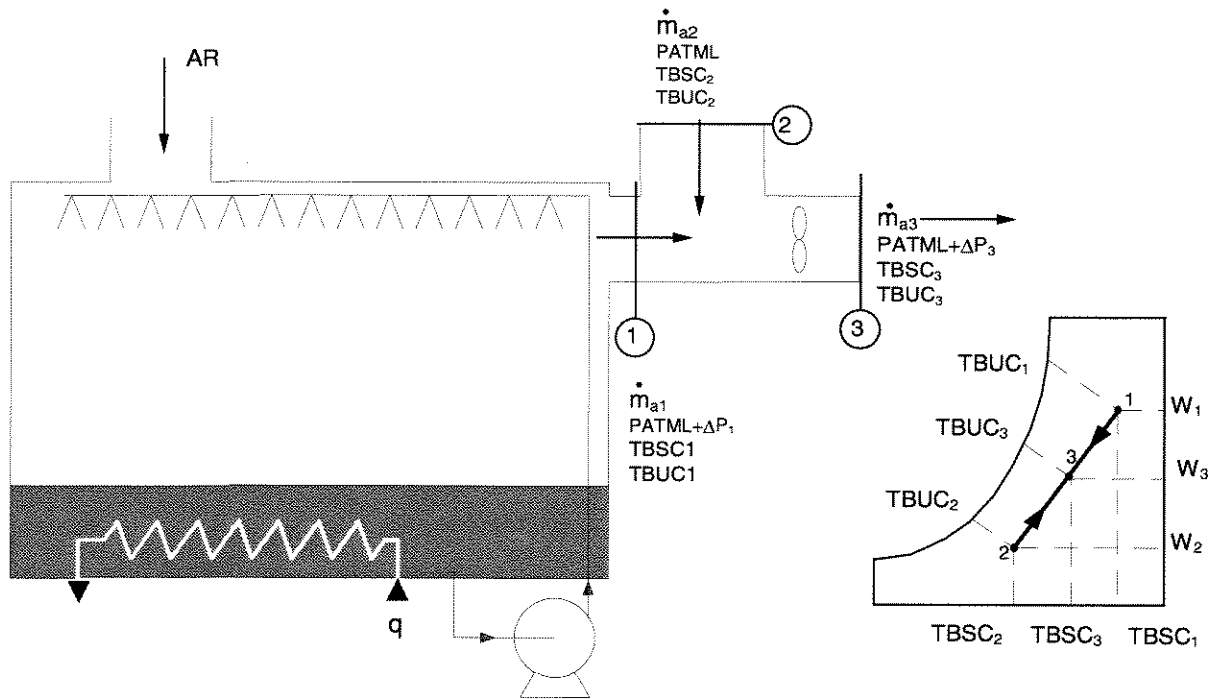


Figura 4.2.2.7.1. Esquema do processo de mistura de duas correntes de ar e respectivo diagrama psicrométrico dos estados iniciais e final- caso A

Sabendo-se ainda que $\dot{m}_{a1} \neq \dot{m}_{a2} \neq \dot{m}_{a3}$, tem-se, através do balanço de massa do ar seco e do vapor de água, as seguintes expressões, respectivamente,

$$\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{a,3} \quad 225$$

e

$$\dot{m}_{a,1} W_1 + \dot{m}_{a,2} W_2 = \dot{m}_{a,3} W_3 \quad 226$$

A eficiência energética (ϵ), pode, então, ser expressa como se segue

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_{a,3} h_3}{\dot{m}_{a,1} h_1 + \dot{m}_{a,2} h_2} \quad 227$$

onde

$$h_3 = h_{a,3} + W_3 h_{v,3} \quad 228$$

Quanto a avaliação exergética, neste caso, o balanço de exergia pode ser definido como

$$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_2 - \dot{I} \quad 229$$

O que leva a eficiência exergética (η), tanto pelo método tradicional (η_T) quanto por aquele proposto por KOTAS (η_K), aos seguintes resultados;

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2} \quad 230$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2} \quad 231$$

Na segunda situação (corrente de ar 2 resfriada pela corrente de ar 1) a corrente de ar 1 entra pela abertura superior da câmara, onde se encontra o evaporador de ar, e foi resfriada, passando pela câmara de produtos perecíveis, circulou pelo duto posterior e entrou na 2ª câmara de condicionamento de ar, local este onde ocorre a mistura com a corrente de ar 2, que vinha a ser um ar externo, o qual adentrou a 2ª câmara pela abertura quadrada de 215 mm de largura e, após misturado, esta corrente de ar 3 passou pelo plenum de ventilação, circulou pelo duto anterior, sob as 3 câmaras de produtos deterioráveis saindo, para o ambiente externo, através da abertura superior do duto da 3ª câmara de produtos deterioráveis.

Neste segundo processo de mistura adiabática de duas correntes de ar, variou-se a vazão de cada corrente através da variação da velocidade do ar de 0,25 m/s até 1,50 m/s, em intervalos de 0,25 m/s.

Monitorou-se e armazenou-se, a cada 15 segundos as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo, do ar após resfriamento da corrente 2 na entrada da segunda câmara de condicionamento, do ar de mistura após a ventilação e do ar de saída para o ambiente externo; a temperatura de bulbo seco do ar na segunda câmara de condicionamento, na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas de contato externo da tubulação do refrigerante, na entrada e na saída do evaporador do ar, na válvula de expansão deste evaporador, na tubulação de sucção e descarga do compressor, na tubulação de saída do tanque de refrigerante e na tubulação de saída de água de condensação do evaporador.

Realizou-se o monitoramento e registro, a cada 15 minutos, da velocidade do ar, da potência elétrica requerida pelos sistemas de ventilação e refrigeração e as pressões de alta e de baixa e respectivas temperaturas equivalentes, através dos manômetros de alta e de baixa, do sistema de refrigeração.

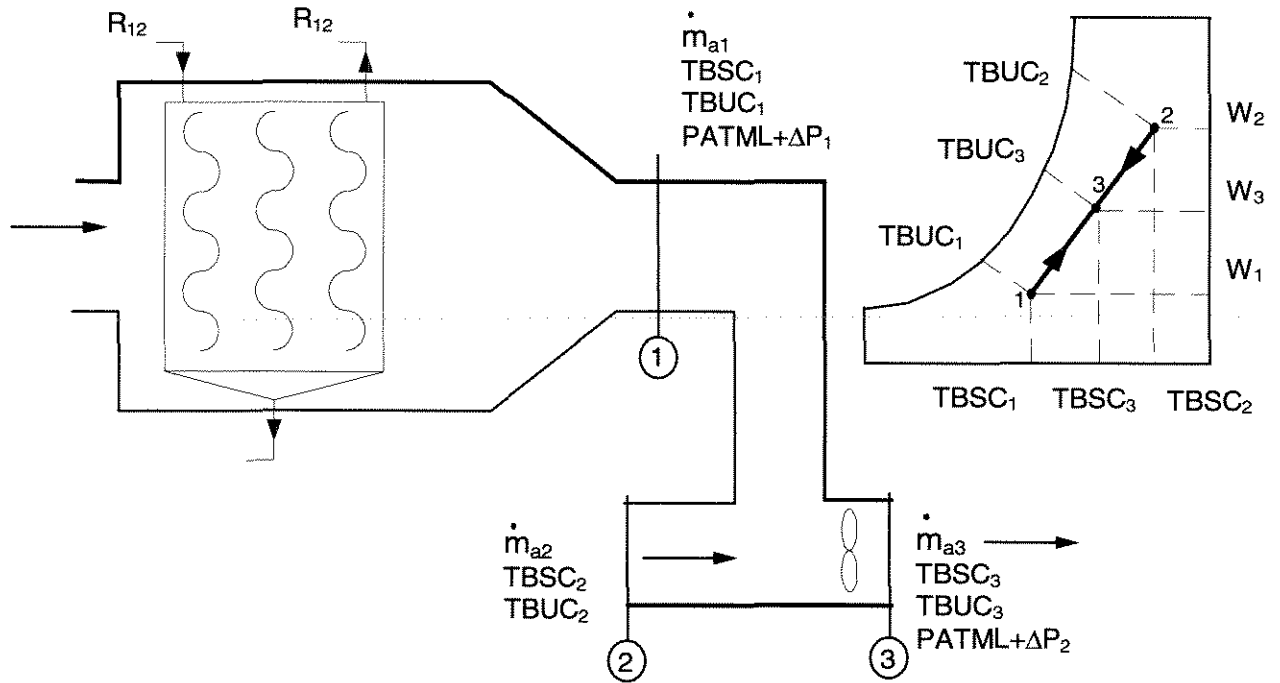


Figura 4.2.2.7.2. Esquema do processo de mistura adiabática de duas correntes de ar e esboço do diagrama psicrométrico com os estados iniciais e final - caso B

Na avaliação energética deste segundo procedimento de mistura adiabática de duas correntes de ar não há diferença, no que diz respeito tanto ao balanço de energia, ao balanço de massa e a eficiência energética, daquele apresentado no primeiro caso; quanto a avaliação exergética e o balanço de exergia e a eficiência de exergia pelos métodos tradicional e racional.

4.2.3 Estudos de casos

4.2.3.1 Introdução

A segunda etapa experimental caracterizou-se pelo estudos de casos utilizando um produto perecível - tomate cereja (*Lycopersicum esculentum* Mill., variedade F₁ híbrido SWEET MILLION) e um produto deteriorável - semente de soja (*Glycine max.*, variedade FOSCARIN).

A avaliação exergética é muito pouco usada em projetos ou sistemas voltados para a área de Engenharia Agrícola, embora apresente-se potencialmente adequada para avaliação e otimização de processos termodinâmicos utilizados nas sub-áreas de pré-processamento de produtos agrícolas, construções rurais, ambiência e energização rural.

Por ser uma metodologia relativamente nova, em quase todas as áreas que se utilizam da termodinâmica aplicada, foi fundamental, como primeiro passo, avaliar a referida metodologia em processos de grande importância para a engenharia agrícola, tais como os processos psicrométricos, que são utilizados em grande escala na preservação de produtos perecíveis e deterioráveis a partir da fase de pós-colheita. Portanto, foi imprescindível, num primeiro instante, avaliar energética e exergeticamente os processos psicrométricos citados no referido trabalho, sem contudo, perder de vista a aplicação final destes resultados em áreas de interesse da Engenharia Agrícola.

Como já foi dito, a definição e o tratamento dos produtos requereram uma avaliação da importância econômica no mercado interno e externo, assim como dependeram de fatores ligados a sazonalidade, que deviam, neste caso, ser compatível com a época do desenvolvimento experimental do trabalho. Portanto, no que diz respeito aos produtos perecíveis (frutas, hortaliças, flores, etc.) escolheu-se o tomate cereja, pela sua facilidade de produção e comercialização próxima a região do experimento.

Quanto aos produtos deterioráveis (grãos, sementes, etc.) optou-se pela sementes de soja, devido a importância financeira, comercial e industrial, além da disponibilidade do produto, com certa facilidade, durante a realização da segunda fase experimental do projeto de pesquisa, isto é a fase aplicativa.

Para cada um dos produtos escolhidos, especificamente, um produto perecível e um produto deteriorável, analisou-se as condições necessárias, mínimas e máximas, de temperatura, umidade e vazão, a fim de manter as qualidades físicas e biológicas dos produtos em questão, através da utilização de processos psicrométricos compatíveis.

É importante frisar neste instante, que tratando-se de produto perecível a preservação pode ocorrer utilizando-se diferentes processos psicrométricos, tais como: resfriamento por expansão direta, resfriamento por água gelada e resfriamento evaporativo. Enquanto que no produto deteriorável (sementes de soja) a secagem pode ocorrer utilizando os seguintes processos psicrométricos: aquecimento e, resfriamento e desumidificação.

Cada produto foi ensaiado utilizando-se os diferentes processos psicrométricos acima citados, levando-se em consideração a manutenção das condições físicas e biológicas dos referidos produtos de acordo com os padrões de qualidade definidos pelas normas do mercado interno e de exportação. Tal procedimento possibilitou não só a avaliação da qualidade da preservação do produto, mas também, a qualidade, em termos exergéticos, do processo empregado.

Os parâmetros medidos em cada processo envolvendo a preservação do produto agrícola, propriamente dito, foram:

para o produto deteriorável:

- Temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido na entrada e saída da câmara de teste;
- Temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido do ar ambiente;
- Velocidade do ar de entrada e de saída na câmara de teste;
- Temperatura da massa do grão ;
- Teor de umidade inicial e final do grão;
- Teores de umidade do grão durante os processos de preservação
- Teste de Germinação e de Vigor inicial e final e,

para o produto perecível:

- Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na entrada e saída da câmara de teste;
- Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente;
- Velocidade do ar de entrada e de saída na câmara de teste;
- Grau Brix;
- Acidez titulável;
- pH;
- Teor de Umidade;
- Temperatura do fruto.

4.2.3.2 Produto perecível:

Iniciou-se pelo produto perecível que, para fins de preservação, foi condicionado no SIGEP utilizando-se três processos psicrométricos distintos, a saber: resfriamento direto, resfriamento por água gelada e resfriamento evaporativo.

Para cada processo foi adquirido junto ao posto de venda do CEASA-Campinas, aproximadamente 12 kg, sendo 6 kg em fase de maturação inicial (estádio colorido) e 6 kg em estado verde, do tomate tipo cereja e, realizou-se três tratamentos em cada processo; o de resfriamento via SIGEP, o resfriamento via geladeira a 6 °C e o tratamento em temperatura ambiente, este último servindo como testemunha.

Na chegada do produto foram retirados 1 fruto de cada saco plástico perfazendo um total de 24 frutos, sendo 12 do estágio verde e 12 do estágio inicial de maturação para realizar as determinações iniciais do teor de umidade, grau Brix, pH e acidez titulável. Com exceção da determinação do teor de umidade, as outras determinações foram repetidas entre 48 e 72 horas da seguinte forma:

- 4 frutos da bandeja superior da câmara de condicionamento
- 4 frutos da bandeja inferior da câmara de condicionamento
- 4 frutos (1 por saco) das amostras à temperatura ambiente do estágio verde
- 4 frutos (1 por saco) das amostras à temperatura ambiente do estágio inicial
- 4 frutos da geladeira do estágio verde
- 4 frutos da geladeira do estágio inicial de maturação.

Em todos os processos a metodologia utilizada para a determinação do grau Brix, do pH, da acidez titulável e do teor de umidade foi realizada da seguinte maneira:

-Determinação do grau Brix

Com 4 frutos de cada amostra realizava-se a trituração completa. Do caldo resultante retirava-se 2 a 3 gotas e colocava-se na lente do refratômetro e fazia-se, através do visor, a leitura focando a escala com o regulador de foco, repetida 3 vezes.

- Determinação do pH

Com o mesmo caldo produzido, colocava-se num bequer apropriado e neste, era inserido o eletrodo de calomelano, previamente limpo com água destilada e seco com pano de algodão, para se efetuar a leitura direta no pHmetro digital, sob agitação, com 3 repetições.

- Determinação da Acidez Titulável

Com, aproximadamente, 10 g do caldo dos frutos diluía-se em 100 ml de água destilada num bequer de 250 ml. Introduzia-se o eletrodo do pHmetro digital e, através de uma pipeta graduada, ia-se gotejando uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) com normalidade conhecida ($\pm 0,1$) até que o pH da solução, em agitação, atingia, em média, o valor de 8,10; quando, então, fazia-se a leitura do volume de NaOH consumido e determinava-se a porcentagem de acidez titulável, mediante o uso da seguinte fórmula, com 3 repetições:

$$\% \text{ de Acidez} = (\text{vol. de NaOH} * \text{Normalidade} * \text{Eq. g. do ácido cítrico}) / 10 * \text{M.A} \quad 232$$

onde:

vol.de NaOH	= volume, em ml, da solução de hidróxido de sódio, para atingir pH médio
Normalidade	= valor característico da solução de NaOH,
Eq. g. do ácido cítrico	= equivalente-grama do ácido cítrico,
10	= fator de conversão
M.A	= massa da amostra utilizada, g

- Determinação do teor de umidade

No início, meio e final de cada experimento com o produto perecível determinou-se seu teor de umidade em uma estufa de ar forçado, com vazão média de ar de 0,0039 m³/s (0,00415 kg_a/s) e na temperatura de 60 °C, onde foram colocados 12 tomates, sendo 6 no estágio verde e 6 no estágio inicial de maturação, cortados em quatro partes, segundo o eixo longitudinal, numa placa petri para cada grupo de amostras. Determinou-se, previamente o peso dos frutos e das respectivas placas. Procedeu-se, então, a secagem até peso constante, sendo que após 24 horas da colocação na estufa fez-se a primeira pesagem e, depois a cada 2 horas realizava-se a pesagem até que o produto atingisse peso constante, com 4 repetições.

Determinou-se o teor de umidade, em base úmida, através da seguinte equação

$$U_{bu} = \frac{M_{H_2O}}{M_t} = \frac{M_i - M_s}{M_t} * 100[\%]$$

233

onde:

U_{bu} = umidade do produto em base úmida, %

M_{H_2O} = massa de água, g

M_t = massa total, g

M_s = massa de matéria seca, g

4.2.3.2.1. Processo de conservação do produto, via resfriamento do ar por contato direto

Para o primeiro processo psicrométrico, resfriamento do ar por contato direto com evaporador de expansão direta, iniciou-se o experimento em 27/03 com a colocação de 4 kg do produto embalado em 8 sacos plásticos transparentes e perfurados de 500g cada, sendo 2 kg (4 sacos) de maturação inicial e 2 kg no estágio verde numa geladeira em ambiente controlado a 6 °C.

No SIGEP, foram colocados também, 4 kg do produto, a granel, sendo 2 kg no estágio verde numa bandeja superior e 2 kg do estágio colorido numa bandeja inferior da câmara de condicionamento de produtos perecíveis. As bandejas suspensas estavam localizadas à alturas equidistantes da câmara, a fim de proporcionar fluxos equivalentes.

Os últimos 4 kg de produto foram mantidos à temperatura ambiente, numa bancada próxima ao SIGEP, divididos, também, em 2 kg de estágio verde e 2 kg de estágio colorido; todos condicionados em 8 sacos plásticos transparentes perfurados com capacidade aproximada de 500 g de frutos por saco.

Ao se iniciar tal fase, tanto a geladeira quanto o SIGEP já estavam em pleno funcionamento, desde o dia anterior para que as condições de choque térmico fossem similares.

No SIGEP, durante os 30 minutos iniciais em que o produto se encontrava dentro da câmara de condicionamento, manteve-se a velocidade do ar de 1,0 m/s e, então reduziu-se para 0,5 m/s por 48 horas; elevando-se novamente para 1,0 m/s por 96 horas. A partir daí oscilou-se a velocidade do ar entre 1,5 e 2,0 m/s em função da quantidade de gelo formado no evaporador. A cada 24 horas o sistema de refrigeração era desligado para se providenciar o degelo do evaporador, que durava de 30 a 60 minutos, dependendo da quantidade de gelo formada. Tanto o volume de água condensada do evaporador quanto o volume de água de degelo eram medidos em provetas graduadas e, tais valores eram registrados em planilha.

Deve-se lembrar que o caminho e os parâmetros monitorados neste processo foram os mesmos daqueles utilizados durante os testes realizados na primeira fase experimental, embora o SIGEP estivesse operando em condições de circuito fechado.

Da mesma maneira que no estudo de caso anterior, a avaliação energética e exergetica deste processo, não sofreram alterações daquela realizada na primeira fase do experimento e, portanto, as equações dos balanços e das eficiências utilizadas foram as mesmas das anteriormente citadas.

Neste processo, tanto a avaliação energética quanto a avaliação exergetica obedeceram as mesmas equações do processo de resfriamento do ar por expansão direta, realizado na primeira fase do experimento.

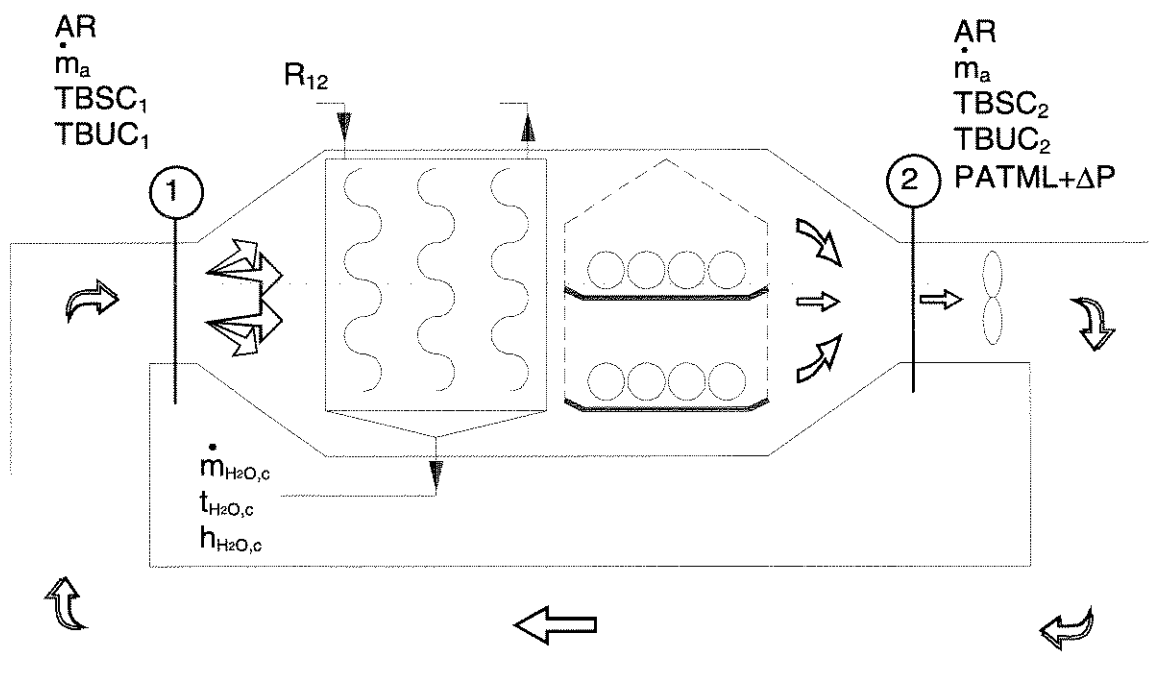


Figura 4.2.3.2.1. Esquema do processo de resfriamento do ar por contato com evaporador aletado de expansão direta para conservação do produto perecível.

4.2.3.2.2. Processo de conservação do produto, via resfriamento do ar por água gelada

O segundo processo psicrométrico utilizado na preservação do produto perecível - tomate cereja - foi o de resfriamento do ar por água gelada. Para tal processo o caminho percorrido pelo ar e os parâmetros monitorados e armazenados estão descritos a seguir.

Num circuito fechado, portanto, num sistema teoricamente fechado, o ar foi resfriado por água gelada na primeira câmara de condicionamento através do evaporador que se encontra na base da referida câmara sob um certo volume de água e sob os aspersores que expelem, a uma vazão constante de 52,2 l/h, água gelada. Este ar, previamente condicionado, passava pela segunda câmara, que se localiza anterior ao plenum de ventilação, depois era descarregado no duto anterior e atravessava a parte inferior das câmaras de produtos deterioráveis, percorrendo toda tubulação da última destas e entrava, novamente, na primeira câmara via abertura circular, que se encontrava na lateral esquerda da tampa de vedação da primeira câmara de condicionamento do ar.

Iniciou-se este experimento, em 29/04, com a aquisição de mais 12 kg., aproximadamente, do tomate cereja em três estádios de maturação distintos, a saber: verde, intermediário e colorido. Um terço de cada estádio foi colocado nos três ambientes preparados, a priori, geladeira a 6 °C, ambiente externo e nas três câmaras de produtos deterioráveis, excepcionalmente. Para tanto, de maneira visual, separou-se manualmente o produto de acordo com a respectiva fase de maturação e obteve-se a seguinte distribuição: 3 kg. de tomate cereja, sendo 1 kg. para cada câmara de produtos; 4 kg. embalados em 8 sacos plásticos perfurados de polietileno, sendo 2 kg. da fase de maturação verde e 2 kg. da fase colorida e, finalmente, 5 kg para o ambiente externo,

também, em sacos plásticos (10), onde 2 kg. eram do estágio verde, 2 kg. do estágio colorido e 1 kg. do estágio intermediário.

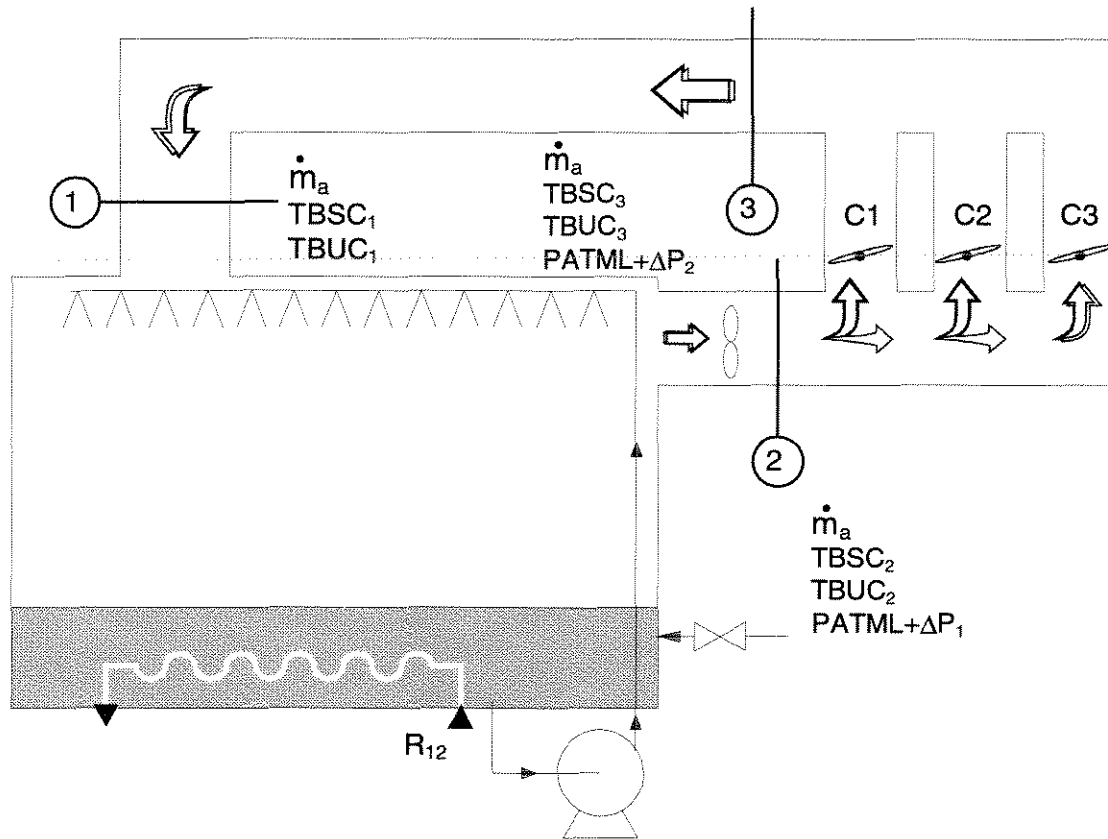


Figura 4.2.3.2.2. Esquema do processo de resfriamento do ar, por água gelada, para fins de conservação do produto perecível.

Na chegada do produto reservou-se 24 frutos para testes de caracterização inicial, sendo doze tomates, com 4 para cada estágio, a fim de se determinar o pH, a Acidez Titulável e o °Brix e, doze frutos, também com 4 para cada estágio, para a determinação do teor de umidade inicial.

Entre 48 a 72 horas eram repetidas as determinações de pH, °Brix e acidez titulável, enquanto que o teor de umidade foi determinado mais duas vezes, uma na metade e outra no final do experimento.

No SIGEP, conforme, foi anteriormente mencionado, colocou-se o produto em gaiolas de tela nas três câmaras de produtos deterioráveis e, monitorou-se e armazenou-se, a cada 15 minutos, durante todo o experimento as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo, do ar após o resfriamento por água gelada, do ar após a ventilação e do ar após a última das câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas de bulbo seco do ar na segunda câmara e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas da água na base inferior da primeira câmara e na saída do último aspersor; as temperaturas de contato externo da tubulação de sucção e de descarga do compressor, da tubulação de saída do tanque de refrigerante, da tubulação de entrada e saída da válvula de expansão, das tubulações hidráulicas de entrada da água na primeira câmara vinda da rede externa, de saída da água da câmara e de entrada da água na bomba.

Durante este experimento, monitorou-se e registrou-se, diariamente, a velocidade do ar, as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação, pela

bomba hidráulica e pelo sistema de refrigeração, além das pressões de alta e de baixa e suas respectivas temperaturas equivalentes, do sistema de refrigeração, através dos manômetros de alta e de baixa.

4.2.3.2.3.- Processo de conservação do produto, via resfriamento evaporativo do ar

O último processo psicrométrico efetuado pelo SIGEP, na preservação do produto perecível - tomate cereja- foi o de resfriamento evaporativo.

Iniciou-se esta fase experimental em 15/05 com a aquisição do último lote de 12 kg. do tomate cereja, em três estádios de maturação diferentes: verde, intermediário e colorido. Com 4 kg., aproximadamente, de cada fase, colocou-se nos três ambientes distintos, previamente ajustados, isto é, geladeira a 6 °C, ambiente externo e no SIGEP, sob a condição de resfriamento evaporativo, nas três câmaras de produtos deterioráveis.

A distribuição do produto, de cada fase de maturação, foi realizada da seguinte maneira: 1 kg. foi colocado em cada uma das três gaiolas alojadas nas câmaras de produtos deterioráveis; 1 kg. do tomate cereja, de cada estágio de maturação, acondicionados em 4 sacos plásticos perfurados de polietileno, na geladeira a 6 °C e, finalmente os 2 kg. restantes de cada fase de maturação, também acondicionados em sacos plásticos, foram deixados em ambiente externo, próximo ao SIGEP.

Reservou-se, ainda, na chegada deste último lote 24 frutos, sendo 8 de cada estágio de maturação, para se efetuar análises das condições iniciais de pH, °Brix, acidez titulável e teor de umidade. Para tanto, separou-se 4 frutos de cada fase de maturação para as três primeiras análises e 4 frutos, também de cada estágio de maturação, para a última análise, isto é, do teor de umidade.

Durante as duas semanas subsequentes, período que durou esta fase experimental, repetiu-se as análises de determinação do pH, °Brix e acidez titulável entre 48 e 72 horas, enquanto que a determinação do teor de umidade foi realizada mais duas vezes, uma na metade e outra no final do experimento.

No SIGEP, operando como um sistema fechado, o ar era resfriado evaporativamente na 1ª câmara de condicionamento, sendo succionado através da segunda câmara de condicionamento de ar, passava pelo plenum de ventilação e, após, era expelido para o circuito de dutos inferiores das câmaras de produtos deterioráveis, onde se encontravam os tomates nas três condições de maturação, atravessava os mesmos e retornava a primeira câmara de condicionamento de ar pelo circuito superior de dutos, entrando pela abertura circular na tampa da referida câmara.

Nesta situação, monitorou-se e armazenou-se a cada 15 minutos, durante todo o processo as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar na câmara de condicionamento, após o plenum de ventilação, no circuito superior de dutos na saída da terceira câmara de produto deteriorável e do ar externo; as temperaturas de bulbo seco do ar na segunda câmara de condicionamento do ar e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas da água na base da primeira câmara e na saída do último aspersor; as temperaturas de contato externo da tubulação de água de saída da câmara, de entrada da bomba e de entrada da câmara, via rede externa.

A cada 24 horas, monitorou-se e registrou-se a velocidade do ar e as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação e pela bomba hidráulica.

Similar aos estudos de casos anteriores, não houve qualquer alteração na avaliação energética e exergetica em comparação aquele realizado na primeira etapa do trabalho experimental.

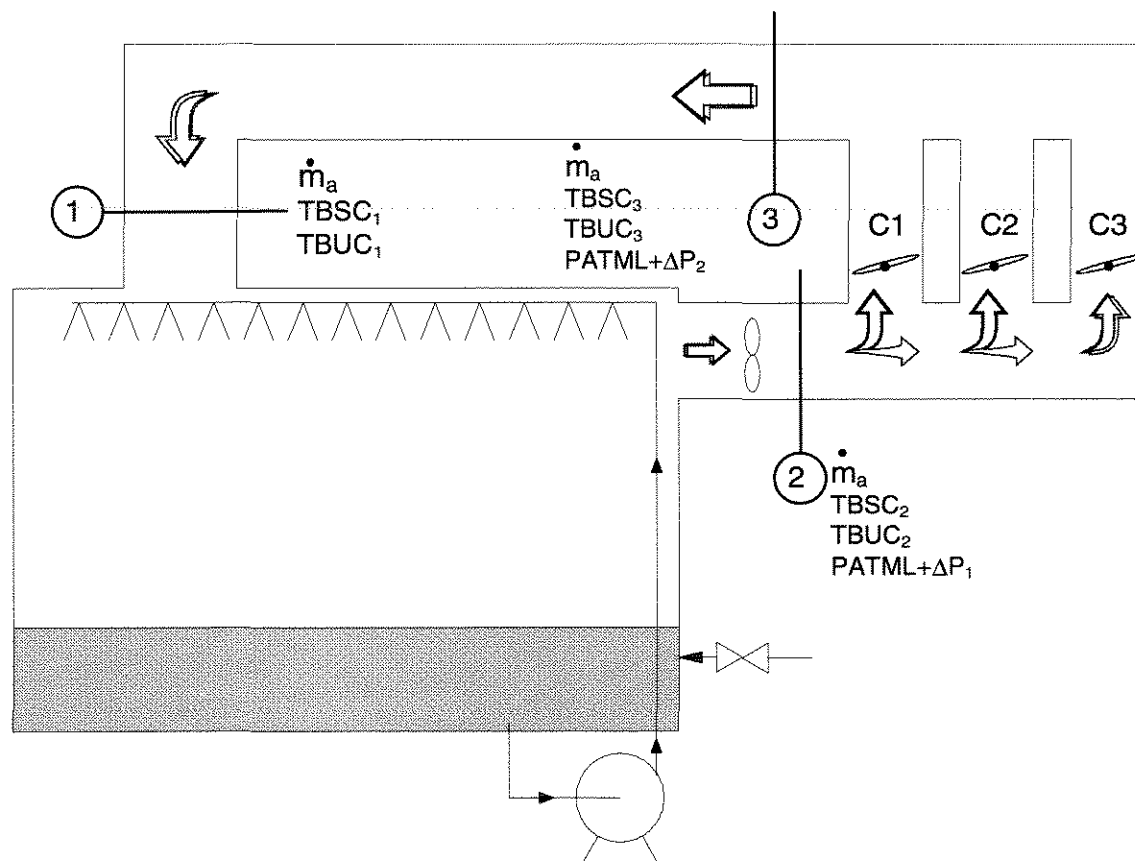


Figura 4.2.3.2.3. Esquema do processo de resfriamento do ar evaporativamente, com a finalidade de conservação do produto perecível.

4.2.3.3. Produto Deteriorável

A conservação do produto deteriorável – sementes de soja (*Glycine max.*) – neste estudo de caso, se deu através da utilização dos processos psicrométricos de aquecimento do ar por resistências elétricas e resfriamento do ar por expansão direta.

Adquiriu-se junto a um produtor oficial de sementes uma quantidade de 40 kg. de sementes de soja, da variedade foscarin, com as seguintes características iniciais : teor médio de umidade de 10,37 % e com poder de germinação de plântulas normais da ordem de 91,5 %.

- Determinação do teor de umidade

Com uma estufa com circulação de ar forçada, previamente condicionada a 105 °C, colocou-se de 3 a 5 cadinhos de tara conhecida com, no mínimo 5 g de grãos de

sementes de soja, com massa conhecida e determinada por balança digital de precisão, em cada um.

Após 24 horas determinou-se a massa total (cadinho + produto) e por diferença determinou-se a massa de produto seco, finalmente, calculou-se o teor de umidade do produto em base úmida, conforme equação 186.

- Determinação do poder de germinação

Num papel germinador (germiteste), utilizado como substrato, com duas folhas para receber as sementes e duas para cobri-las, colocou-se 200 sementes, sendo 4 sub-amostras de 50 sementes cada, distribuídas da seguinte maneira: quatro sementes por fileira e cada fileira espaçada de 25 mm entre si. Umideceu-se o papel com água destilada numa proporção de 2,5 vezes o peso do papel. Após isto, colocou-se as folhas no germinador, previamente programado para que a cada 24 horas tivesse 16 horas a uma temperatura de 20 ± 2 °C e 8 horas a uma temperatura de 30 ± 2 °C, simulando condições de noite e dia. A primeira contagem de germinação ocorreu no quinto dia e a segunda e última contagem no décimo terceiro dia.

Na primeira contagem (5^o dia) todas as plântulas que apresentaram bom desenvolvimento e morfologicamente perfeitas, sem rachaduras, lesões ou necroses, são removidas e classificadas como plântulas normais fortes. Por outro lado, as sementes em estado de deterioração são removidas e anotadas, enquanto que as plântulas que não preencheram os critérios estabelecidos para plântulas normais, permanecem no teste até a contagem final.

Na segunda contagem (13^o dia) as plântulas remanescentes são classificadas como normais ou anormais, de acordo com as prescrição das Regras para Análise de Sementes da CLAV (1992), sendo que as normais são classificadas como fortes ou fracas. Devem ser consideradas como plântulas normais fracas, todas aquelas que apresentem lesões, rachaduras ou necroses na sua estrutura, embora não caracterizando anormalidades das plântulas.

Os resultados do teste são expressos em porcentagem média de plântulas normais fortes.

- Determinação do teste de vigor

Na recepção, início e final de cada tratamento com os processos psicrométricos de resfriamento do ar por expansão direta e aquecimento do ar por resistências elétricas, foram realizados teste de poder de vigor contra danos mecânicos.

Após a verificação do índice de germinação (% média de plântulas normais fortes) mínimo, de acordo com a tabela da CLAV, submeteu-se, também, um lote de 200 sementes, sendo quatro sub-amostras de 50 sementes a uma temperatura de 42 °C por 48 horas, a fim de se avaliar, após germinação, o vigor das sementes a danos mecânicos.

Em sequência, coloca-se estas sub-amostras no substrato (folhas de papel toalha - germiteste) umedecido com água destilada numa proporção de 2,5 vezes o peso do papel seco, em quatro folhas por lote, conforme metodologia descrita anteriormente.

Com o objetivo de analisar os efeitos dos processos psicrométricos na conservação do referido produto, realizou-se a separação de 15 kg., aproximadamente, colocados em 9 sacos plásticos transparentes de polietileno e procedeu-se a umidificação do produto via borrifamento de água por bomba de spray manual até atingir um teor de umidade próximo ao da colheita, que era em torno de 17 %. Após isto, manteve-se os nove sacos em geladeira a - 1,0 °C até o início do experimento.

Com a elevação do teor de umidade, mencionado anteriormente, realizou-se o teste de vigor e, novamente o teste de poder de germinação da semente de soja, a fim de averiguar se houve qualquer alteração nos padrões de qualidade da semente.

4.2.3.3.1. Processo de conservação do produto, via secagem a altas vazões, por aquecimento do ar com resistências elétricas

Iniciou-se o tratamento de conservação da semente através do processo psicrométrico de aquecimento do ar por resistência elétrica, para isso, colocou-se, nas três gaiolas de produtos deterioráveis do SIGEP, aproximadamente 1200 g. das sementes de soja.

De acordo com a literatura, citada na revisão bibliográfica, manteve-se a temperatura de bulbo seco do ar em 32°C , a fim de preservar as qualidades do produto, reduzindo o teor de umidade do patamar inicial de $\pm 17\%$ para as condições recomendadas, que é em torno de $\pm 11\%$.

Com a válvula de regulagem de fluxo de ar, instaladas nos cilindros de sustentação das gaiolas, regulou-se a vazão do ar de cada câmara de produto deteriorável para que tivesse as seguintes velocidades do ar atravessando a massa de grãos; 1,5 m/s na câmara 1; 2,5 m/s na câmara 2 e, finalmente 3,5 m/s na câmara 3.

A operação de secagem, de acordo com a montagem realizada no SIGEP, ocorre de forma similar aos secadores de leito fixo ou camada fixa, pois o produto permanece estático durante a secagem, enquanto o fluxo de ar quente atravessa a massa de grãos. Nesta situação, o ar de secagem aquecido movimentava-se da camada inferior para a superfície superior da massa de grãos. Observa-se, então, uma zona de secagem que se move no sentido da camada inferior para a camada superior. Com a necessidade de se manter o gradiente de umidade entre as camadas o mais baixo possível, realizava-se o revolvimento manual do produto, quando retirava-se amostras para a determinação do teor de umidade, o que ocorria a cada 30 minutos.

O percurso do ar, no SIGEP, ocorria da seguinte maneira: o ar externo era succionado para dentro do equipamento através da porta da câmara de produtos perecíveis, passava pelo circuito de dutos posterior e, então, era aquecido pelo conjunto de resistências elétricas na segunda câmara de condicionamento de ar, anterior ao plenum de ventilação; depois, era propulsionado pelo ventilador para as câmaras de secagem, nas quais entrava pela parte inferior dos cilindros a diferentes velocidades, atravessava a massa de grãos de cada gaiola e saía pela parte superior das câmaras de produtos deterioráveis; sendo, finalmente, lançado para o ambiente externo através da abertura existente acima da terceira câmara.

Neste experimento realizou-se o monitoramento e armazenamento das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo, do ar na câmara de produtos perecíveis, anterior ao circuito de dutos posterior, do ar após o plenum de ventilação e do ar após a terceira câmara de produtos deterioráveis; a temperatura de bulbo seco do ar na segunda câmara de condicionamento onde se encontrava o conjunto de resistências elétricas e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; as temperaturas de contato externo nas resistências elétricas e na massa de grãos; todas a cada 15 segundos. Enquanto que as potências elétricas requeridas pelo sistema de ventilação e pelo conjunto de resistências eram monitoradas e registradas a cada 30 minutos, toda vez que se procedia o revolvimento da massa de grãos e a retirada de amostra para a

determinação do teor de umidade, via medidor universal. Encerrou-se este teste quando foi atingido o teor de umidade desejada, determinado pelo referido aparelho.

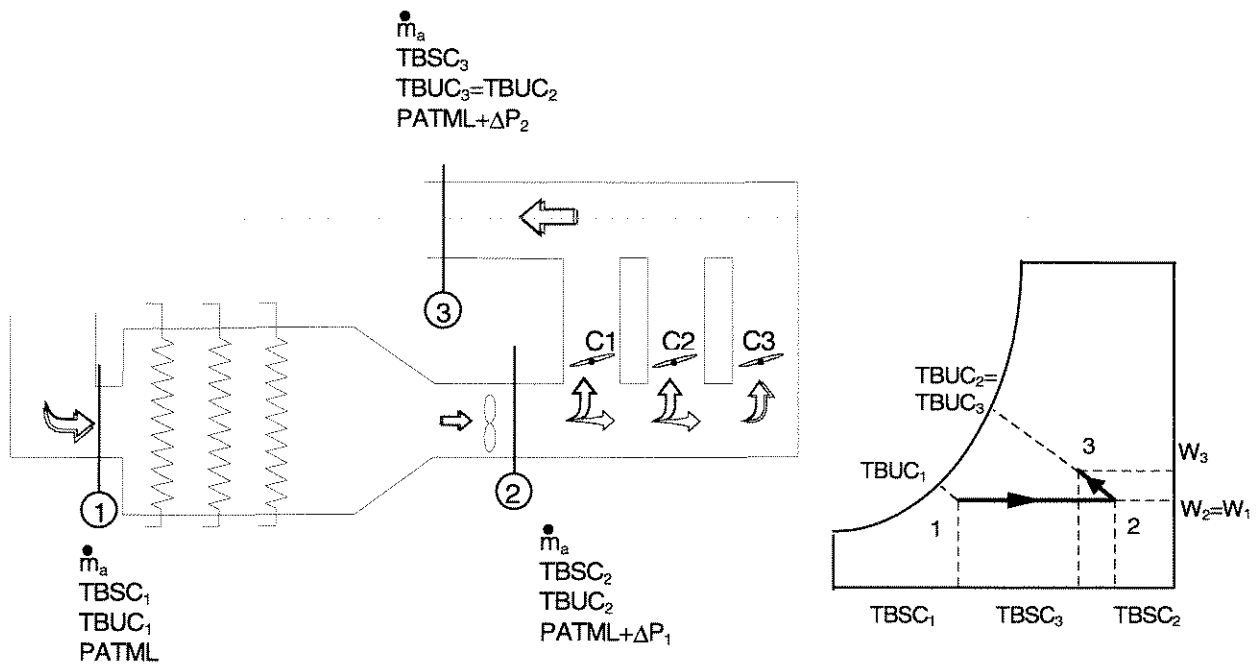


Figura 4.2.3.3.1. Esquema do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas aplicados na conservação do produto deteriorável e esboço do diagrama psicrométrico com os estados dos pontos 1, 2 e 3 do volume de controle.

Diferente dos processos psicrométricos aplicados ao produto perecível, a utilização do aquecimento do ar no tratamento do produto deteriorável, provoca uma redução do teor de umidade dos grãos, umidade esta que é adicionada ao ar que atravessa a massa de grãos, provocando, portanto, sua umidificação. Desta maneira, neste estudo de caso, tanto o processo quanto suas respectivas avaliações, energética e exérgica, sofreram modificações em relação aquelas utilizadas no processo de aquecimento do ar, via resistências elétricas, durante a primeira fase experimental.

Em vista disso, apresenta-se, a seguir, as avaliações energética e exérgica do referido processo:

O balanço de energia deste processo pode ser descrito através da seguinte expressão:

$${}_1\dot{q}_3 = \dot{m}_a \left((h_2 - h_1) + (W_3 - W_1) * h_{H_2O} \right) \quad 234$$

A eficiência energética (ϵ) deste tratamento pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\varepsilon = \frac{{}_1\dot{q}_3}{PE_{RAR}} \quad 235$$

Na avaliação exergética, o balanço de exergia do processo de secagem do produto deteriorável pode ser descrito em duas etapas, a saber: balanço de exergia do processo de aquecimento e, posteriormente, balanço de exergia do processo de umidificação do ar pela introdução da água, retirada do produto, na corrente de ar. Então, tem-se:

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_Q - \dot{I}_A \quad 236$$

onde,

\dot{I}_A = Irreversibilidades durante o processo de aquecimento, kJ/s.

As eficiências exergéticas (η) do processo de aquecimento pelo método tradicional (η_T) e pelo método proposto por KOTAS, podem ser apresentadas da seguinte forma:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_Q} \quad 237$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_Q} \quad 238$$

O balanço de exergia do processo de umidificação do ar pela água, retirada do produto durante a secagem, pode ser representado pela seguinte equação:

$$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O} - \dot{I}_U \quad 239$$

onde,

\dot{I}_U = irreversibilidades durante o processo de umidificação, kJ/s.

$\dot{E}x_{H_2O}$ = exergia da água, definida pelas equações 183 ou 183', kJ/s.

As eficiências exergéticas, tanto pelo método tradicional (η_T) quanto pelo método de KOTAS (η_K), são definidas pelas equações abaixo:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O}} \quad 240$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2}{\dot{E}x_{H_2O}} \quad 241$$

4.2.3.3.2. Processo de conservação do produto, via secagem por resfriamento do ar através do contato direto com evaporador aletado

O segundo teste realizado no SIGEP, como estudo de caso, para produtos deterioráveis, foi a redução do teor de umidade das sementes de soja através do resfriamento do ar via evaporador de expansão direta.

Neste processo o ar externo era succionado através da abertura circular superior da câmara onde se encontra o evaporador, atravessava a câmara de produtos perecíveis e atingia a segunda câmara de condicionamento do ar através do circuito de dutos posterior, passava pelo plenum de ventilação onde o ar era, então, forçado para a parte inferior das três câmaras e atravessava a massa de grãos, saindo pela abertura superior, após a terceira câmara de produtos deterioráveis.

O monitoramento e armazenamento das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo, do ar após o resfriamento, na saída da câmara de produtos perecíveis, do ar após o plenum de ventilação e do ar após a terceira câmara de produtos deterioráveis; das temperaturas de bulbo seco do ar na segunda câmara de condicionamento e na parte inferior das três câmaras de produtos deterioráveis; das temperaturas de contato externo na entrada e na saída do evaporador, na válvula de expansão, nas tubulações de carga e descarga do compressor, na saída do tanque de refrigerante e a temperatura de água de condensação do evaporador, ocorriam a cada 60 segundos.

Efetuuou-se, ainda, o monitoramento e registro, a cada 60 minutos, da velocidade do ar que variava de 1,40 a 2,40 m/s no primeiro cilindro, de 3,95 a 5,23 m/s no segundo cilindro e de 3,22 a 3,81 m/s no terceiro e último cilindro; das potências elétricas requeridas pelos sistemas de ventilação e refrigeração; as pressões de alta e de baixa do sistema de refrigeração e as temperaturas da massa de grãos nas três câmaras, quando se procedia o revolvimento das sementes de soja e retirada das amostras para a

determinação do teor de umidade, via medidor universal de teor de umidade, nas três câmaras de produtos deterioráveis.

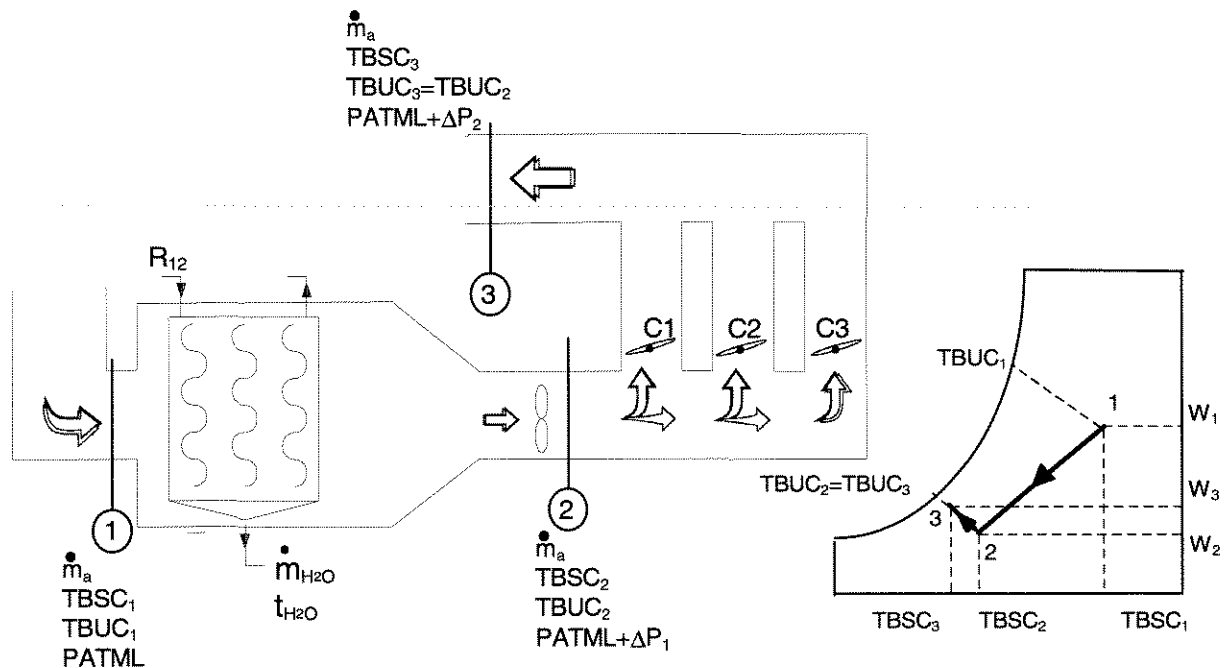


Figura 4.2.3.3.2. Esquema do processo de resfriamento do ar, por contato direto com evaporador aletado, na conservação do produto deteriorável e esboço do diagrama psicrométrico com os estados dos pontos 1, 2 e 3 do volume de controle.

Neste penúltimo processo realizado durante a fase experimental, o balanço de energia pode ser descrito pela seguinte equação:

$${}_1\dot{q}_3 = \dot{m}_a ((h_1 - h_2) - (W_1 - W_2) * h_{H_2O} + (W_3 - W_2) * h_{vH_2O}) \quad 242$$

A eficiência energética (ε) nesta situação pode ser formulada através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{{}_1\dot{q}_3}{PE_{SR}} \quad 243$$

A avaliação exergética do referido processo, de outra maneira, pode ser descrita pela combinação de duas etapas distintas, a primeira diz respeito somente ao processo de resfriamento e desumidificação do ar, enquanto a segunda abrange o processo de secagem do produto deteriorável e, conseqüentemente, a umidificação do ar de saída, como está demonstrado a seguir.

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_Q - \dot{E}x_{H_2O,l} - \dot{I}_R \quad 244$$

e

$$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O,v} - \dot{I}_U \quad 245$$

onde,

\dot{I}_R = irreversibilidades durante o processo de resfriamento e desumidificação do ar, kJ/s

\dot{I}_U = irreversibilidades durante o processo de umidificação do ar, kJ/s.

Com os balanços exergéticos acima, foi possível determinar as eficiências exergéticas (η) pelo método tradicional (η_T) e pelo método de KOTAS (η_K), em ambas as etapas, respectivamente, da seguinte maneira:

- resfriamento e desumidificação do ar:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O,l}}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_Q} \quad 246$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O,l} - \dot{E}x_1}{\dot{E}x_Q} \quad 247$$

- umidificação do ar:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}x_3}{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{H_2O,v}} \quad 248$$

e

$$\eta_K = \frac{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2}{\dot{E}x_{H_2O,v}} \quad 249$$

4.2.3.3.3. Processo de conservação do produto, via secagem a baixas vazões, com o aquecimento do ar por resistências elétricas

Finalmente, encerrou-se este estudo de casos com a secagem das sementes de soja através do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, todavia, diferente do primeiro teste, trabalhou-se neste caso com baixas velocidades do ar, onde na primeira câmara de produtos deterioráveis a velocidade do ar variou de 0,31 a 0,51 m/s, na segunda câmara tinha-se velocidades do ar de 1,43 a 1,59 m/s e, por último, o terceiro cilindro apresentou uma variação na velocidade do ar de 0,85 a 1,05 m/s.

O caminho ou percurso adotado para o ar foi o mesmo do primeiro teste, assim como os parâmetros monitorados e armazenados, com a única diferença de que nesta situação o revolvimento e consequente retirada de amostras para a determinação do teor de umidade foram feitos a cada 60 minutos.

Este caso apresenta o mesmo esquema do primeiro processo de conservação do produto deteriorável, assim como, tanto a avaliação energética quanto a avaliação exergetica podem ser descritas pelas equações de 234 a 241.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. APRESENTAÇÃO

Conforme descrito na metodologia, realizou-se, durante o primeiro semestre de 1996, o experimento de geração dos processos psicrométricos de aquecimento do ar via resistências elétricas; aquecimento e umidificação do ar por água quente; umidificação e aquecimento de um fluxo de ar; resfriamento do ar por contato direto com um evaporador aletado; resfriamento do ar por água gelada; resfriamento evaporativo do ar e; finalmente, mistura adiabática de dois fluxos de ar. Além dos processos psicrométricos, acima citados, efetuou-se, como estudo de casos, primeiramente, a conservação do produto perecível: tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* Mill., variedade F₁, híbrido SWEET MILLION) através dos seguintes processos psicrométricos: resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar e; em segundo, a conservação do produto deteriorável: sementes de soja (*Glycine max.*, variedade Foscarin) utilizando-se dos seguintes processos psicrométricos: aquecimento do ar via resistências elétricas e resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

5.2. RESULTADOS

5.2.1. Introdução

Os resultados obtidos estão apresentados, a seguir, na mesma sequência com que foram descritos no capítulo anterior, dentro do item de metodologia.

Devido ao fato de que, em cada experimento realizado, produziu-se um número elevado de dados, procurou-se selecionar, dentre todos aqueles que foram gerados, uma tabela representativa, temporal e estatisticamente significativa, onde de cada processo retirou-se tabelas que apresentavam as máximas eficiências energética e exérgica e as mínimas eficiências energética e exérgica, dos dados obtidos; deixando, todavia, todos os resultados no Apêndice AP - 05.

5.2.2. Processos Psicrométricos

5.2.2.1. Aquecimento do ar via resistências elétricas:

TABELA 5.2.2.1.1. Resultados da avaliação energética e exergética do processo psicrométrico de aquecimento do ar via resistências elétricas; com velocidade do ar de 0.10 m/s e potência elétrica das resistências de 616 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		21.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		18.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		45.0	C
Velocidade do ar		0.10	m/s
Variação de Pressão do Ar de Saída		0.5	kPa
Pot. Elétrica Req. pelo Sistema de Aquecimento		616.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	: AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	21.0	45.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	18.0	25.2	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	16.5	16.5	C
Pressão de Saturação na(TBS)	2.5	9.6	kPa
Pressão de Saturação na(TBU)	2.1	3.2	kPa
Pressão de Saturação na(TPO)	1.9	1.9	kPa
Umidade Absoluta	0.013	0.013	kgv/kgda
Umidade Relativa	75.7	19.7	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.99	m ³ /kgda
Entalpia do Ar Úmido	53.7	78.4	kJ/kg
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO:			
Área do Duto		0.018	m ²
Fluxo Volumétrico		0.002	m ³ /s
Fluxo Mássico		0.002	kgda/s
Variação Entálpica		24.7	kJ/kg
Variação Energética		43.8	J/s
Eficiência de 1ª Lei		7.1	%
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO EXERGÉTICO:			
Exergia no ponto 1		0.0000	J/s
Exergia no ponto 2		2.61	J/s
Exergia da fonte de aquecimento		616.0	J/s
Irreversibilidade do processo		613.4	J/s
Eficiência de 2ª Lei-TRADICIONAL		0.4	%
Eficiência de 2ª Lei-T.J. KOTAS		0.4	%

TABELA 5.2.2.1.2. Resultados da avaliação energética e exergetica do processo psicrometrico de aquecimento do ar via resistências elétricas; com velocidade do ar de 3.00 m/s e potência elétrica das resistências de 2332 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		27.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		25.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		46.0	C
Velocidade do ar		3.0	m/s
Varição de Pressão do Ar de Saída		0.5	kPa
Pot. Elétrica Req. pelo Sistema de Aquecimento		2332.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	: AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	27.0	46.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	25.0	29.6	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	24.3	24.3	C
Pressão de Saturação na(TBS)	3.6	10.1	kPa
Pressão de Saturação na(TBU)	3.2	4.1	kPa
Pressão de Saturação na(TPO)	3.0	3.0	kPa
Umidade Absoluta	0.02	0.02	kgv/kga
Umidade Relativa	85.5	30.3	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	1.01	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	80.7	100.6	kJ/kg
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO			
Área do Duto		0.018	m ²
Fluxo Volumétrico		0.053	m ³ /s
Fluxo Mássico		0.052	kg/s
Varição Entálpica		19.9	kJ/kg
Varição Energética		1038.6	J/s
Eficiência de 1ª Lei		44.5	%
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO EXERGETICO			
Exergia no ponto 1		0.0	J/s
Exergia no ponto 2		58.3	J/s
Exergia da fonte de aquecimento		2332.0	J/s
Irreversibilidade do processo		2273.7	J/s
Eficiência de 2ª Lei-TRADICIONAL		2.5	%
Eficiência de 2ª Lei-T.J. KOTAS		2.5	%

5.2.2.2. Aquecimento e umidificação do ar por água quente:

TABELA 5.2.2.2.1. Resultados do processo psicrométrico de aquecimento e umidificação do ar por água quente com velocidade do ar de 0.25 m/s e potência elétrica requerida pelas resistências da água de 376 W, considerando o efeito da potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1025 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		27.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		24.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		30.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		30.0	C
Velocidade do ar		0.25	m/s
Varição de Pressão do Ar de Saída		0.75	kPa
Pot. Elétrica Req. pelo Sistema de Aquec. e umidif.		1401.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	27.0	30.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	24.0	30.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	22.9	30.0	C
Pressão de Saturação na(TBS)	3.6	4.2	kPa
Pressão de Saturação na(TBU)	2.9	4.2	kPa
Pressão de Saturação na(TPO)	2.7	4.2	kPa
Umidade Absoluta	0.02	0.03	kgv/kga
Umidade Relativa	78.7	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.98	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	76.3	105.8	kJ/kg
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO			
Área do Duto		0.018	m ²
Fluxo Volumétrico		0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico		0.005	kg/s
Varição Entálpica		29.5	kJ/kg
Varição Energética		133.6	J/s
Eficiência de 1ª Lei		9.5	%
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO EXERGÉTICO			
Exergia no ponto 1		0.0	J/s
Exergia no ponto 2		4.8	J/s
Exergia da fonte de aquec. e umidif.		1401.0	J/s
Irreversibilidade do processo		1396.2	J/s
Eficiência de 2ª Lei-TRADICIONAL		0.3	%
Eficiência de 2ª Lei-T.J. KOTAS		0.3	%

TABELA 5.2.2.2.2. Resultados do processo psicrométrico de aquecimento e umidificação do ar por água quente com velocidade do ar de 0.50 m/s e potência elétrica requerida pelas resistências da água de 509 W, desprezando o efeito da potência elétrica requerida pela bomba hidráulica.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		26.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		23.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		28.0	C
Velocidade do ar		0.5	m/s
Variação de Pressão do Ar de Saída		0.75	kPa
Pot. Elétrica Req. pelo Sistema de Aquec. e umidif.		509.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	26.0	28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	23.0	28.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	21.9	28.0	C
Pressão de Saturação na(TBS)	3.4	3.8	kPa
Pressão de Saturação na(TBU)	2.8	3.8	kPa
Pressão de Saturação na(TPO)	2.6	3.8	kPa
Umidade Absoluta	0.02	0.03	kgv/kga
Umidade Relativa	78.2	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.97	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	72.1	95.1	kJ/kg
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO			
Área do Duto		0.018	m ²
Fluxo Volumétrico		0.009	m ³ /s
Fluxo Mássico		0.009	kga/s
Variação Entálpica		23.0	kJ/kg
Variação Energética		210.8	J/s
Eficiência de 1ª Lei		41.4	%
RESULTADOS DO CÁLCULO DO BALANÇO EXERGETICO			
Exergia no ponto 1		0.0	J/s
Exergia no ponto 2		8.6	J/s
Exergia da fonte de aquec. e umidif.		509.0	J/s
Irreversibilidade do processo		500.4	J/s
Eficiência de 2ª Lei-TRADICIONAL		1.7	%
Eficiência de 2ª Lei-T.J. KOTAS		1.7	%

5.2.2.3. Umidificação e aquecimento do ar

TABELA 5.2.2.3.1. Resultados do processo psicrométrico de umidificação e aquecimento do ar, com veloc. do ar de 0.25 m/s e pot. elétrica requerida pelas resistências de 608 W e pot. elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada			22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada			18.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar umidificado			25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ar umidificado			25.0	C
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 2			0.5	kPa
Velocidade do ar			0.25	m/s
Pot. Elet. Req. pela Sist. de umidif			1050.0	J/s
Temperatura da Água na saída dos aspersores			34.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido			44.0	C
Varição de Pressão entre os pontos 2 e 3			0.25	kPa
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de aquec.			608.0	J/s
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	UMIDIFICADO	AQUECIDO	UNIDADE
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	25.0	44.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	18.0	25.0	29.5	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	16.0	25.0	24.9	C
Umidade Absoluta do ar	0.012	0.022	0.022	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	68.9	100.0	34.9	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.93	0.95	1.01	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	53.6	80.8	100.7	kJ/kg
RESULTADOS DO PROCESSO DE UMIDIFICACAO - BALANCO ENERGETICO				
Entalpia da água			142.1	kJ/kgv
Vazão do ar			0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar			0.005	kg/s
Energia de umidificação (1-2)			6.4	J/s
Eficiência de 1ª Lei entre 1 e 2			0.61	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE UMIDIFICACAO - BALANCO EXERGETICO				
Exergia do ponto 1			0.0	J/s
Exergia do ponto 2			4.2	J/s
Exergia da fonte de umidificação			1050.0	J/s
Irreversibilidade da umidificação (1 a 2)			1045.8	J/s
Eficiência de 2ª lei - TRADICIONAL (1 a 2)			0.40	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. KOTAS (1 a 2)			0.40	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE AQUECIMENTO - BALANCO ENERGETICO				
Fluxo Mássico do ar			0.005	kg/s
Energia de aquecimento (2-3)			94.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei entre 2 e 3			15.6	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE AQUECIMENTO - BALANCO EXERGETICO				
Exergia do ponto 2			4.2	J/s
Exergia do ponto 3			7.1	J/s
Exergia da fonte de aquecimento			608.0	J/s
Irreversibilidade do aquecimento (2-3)			605.1	J/s
Eficiência de 2ª lei - TRADICIONAL entre 2 e 3			1.16	%
Eficiência de 2ª lei - KOTAS entre 2 e 3			0.48	%
RESULTADOS DO PROCESSO: UMIDIFICACAO + AQUECIMENTO - (AVALIACAO ENERGETICA)				
Energia resultante do proc. global (1 a 3)			101.4	J/s
Eficiência de 1ª Lei do proc. global (1 a 3)			6.11	%
RESULTADOS DO PROCESSO: UMIDIFICACAO + AQUECIMENTO - (AVALIACAO EXERGETICA)				
Balanco Exergetico do proc. global (1 a 3)			11.3	J/s
Efic. de 2ª lei - TRADICIONAL - proc. global (1 a 3)			0.68	%
Efic. de 2ª lei - T. J. KOTAS - proc. global (1 a 3)			0.68	%

TABELA 5.2.2.3.2. Resultados do processo psicrométrico de umidificação e aquecimento do ar, com velocidade do ar de 1.50 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2232 W e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada			28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada			20.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar umidificado			27.0	C
Temperatura de Bulbo Umido do ar umidificado			27.0	C
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 2			0.50	kPa
Velocidade do ar			1.50	m/s
Pot. Elet. Req. pela Sist. de umidif			1050.0	J/s
Temperatura da Água na saída dos aspersores			32.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido			87.0	C
Varição de Pressão entre os pontos 2 e 3			0.25	kPa
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de aquec.			2232.0	J/s
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	UMIDIFICADO	AQUECIDO	UNIDADE
Temperatura de Bulbo Seco	28.0	27.0	87.0	C
Temperatura de Bulbo Umido	20.0	27.0	38.3	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	16.3	27.0	26.9	C
Umidade Absoluta do ar	0.013	0.025	0.025	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	49.2	100.0	5.8	%
Volume Específico do Ar Umido	0.95	0.96	1.15	m ³ /kga
Entalpia do Ar Umido	60.4	90.1	153.3	kJ/kga
RESULTADOS DO PROCESSO DE UMIDIFICACAO - BALANCO ENERGETICO				
Entalpia da água			133.8	kJ/kgv
Vazão do ar			0.03	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar			0.03	kg/s
Energia de umidificação (1-2)			45.2	J/s
Eficiência de 1ª Lei entre 1 e 2			4.3	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE UMIDIFICACAO - BALANCO EXERGETICO				
Exergia do ponto 1			0.0	J/s
Exergia do ponto 2			30.6	J/s
Exergia da fonte de umidificação			1050.0	J/s
Irreversibilidade da umidificação (1 a 2)			1019.4	J/s
Eficiência de 2ª lei - TRADICIONAL (1 a 2)			2.9	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. KOTAS (1 a 2)			2.9	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE AQUECIMENTO - BALANCO ENERGETICO				
Fluxo Mássico do ar			0.03	kg/s
Energia de aquecimento (2-3)			1772.4	J/s
Eficiência de 1ª Lei entre 2 e 3			79.4	%
RESULTADOS DO PROCESSO DE AQUECIMENTO - BALANCO EXERGETICO				
Exergia do ponto 2			30.6	J/s
Exergia do ponto 3			186.4	J/s
Exergia da fonte de aquecimento			2232.0	J/s
Irreversibilidade do aquecimento (2-3)			2076.2	J/s
Eficiência de 2ª lei - TRADICIONAL entre 2 e 3			8.2	%
Eficiência de 2ª lei - KOTAS entre 2 e 3			6.9	%
RESULTADOS DO PROCESSO: UMIDIFICACAO + AQUECIMENTO - (AVALIACAO ENERGETICA)				
Energia resultante do proc. global (1 a 3)			1817.6	J/s
Eficiência de 1ª Lei do proc. global (1 a 3)			55.4	%
RESULTADOS DO PROCESSO: UMIDIFICACAO + AQUECIMENTO - (AVALIACAO EXERGETICA)				
Balanco Exergetico do proc. global (1 a 3)			216.9	J/s
Efic. de 2ª lei - TRADICIONAL - proc. global (1 a 3)			6.6	%
Efic. de 2ª lei - T. J. KOTAS - proc. global (1 a 3)			6.6	%

5.2.2.4. Resfriamento e desumidificação do ar por contato direto com evaporador aletado

TABELA 5.2.2.4.1 Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 0.25 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		22.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		13.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		12.0	C
Temperatura da água de condensação		20.0	C
Vazão da água de condensação		1.4E-07	m ³ /s
Variação de Pressão entre 1 e 2		1.0	kPa
Velocidade do ar		0.25	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1000.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DO PARÂMETRO	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	25.0	13.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	22.0	12.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	20.8	11.3	C
Pressão de Saturação na TBS	3.2	1.5	kPa
Pressão de Saturação na TBU	2.6	1.4	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.5	1.3	kPa
Umidade Absoluta	0.017	0.009	kgv/kgda
Umidade Relativa	77.8	89.6	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.94	0.89	m ³ /kgda
Entalpia do Ar Úmido	68.1	36.0	kJ/kgda
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGETICA			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do ar		0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.005	kgda/s
Variação de Umidade		-0.008	kgv/kgda
Variação Entálpica do Ar		-32.1	kJ/kgda
Entalpia da Água (Estado Líquido)		83.7	kJ/kgv
Entalpia da Água (Estado de Vapor)		2547.0	kJ/kgv
Energia calorífica retirada		147.5	J/s
Eficiência de 1ª Lei		14.7	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA			
Entropia da Água (Estado Líquido)		0.3	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)		8.6	kJ/kgv.K
Exergia do Ar de Entrada		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída		6.9	J/s
Exergia da Água		8.7	J/s
Exergia do Sist. de Refrigeração		1000.0	J/s
Irreversibilidade do processo de resfriamento		984.3	J/s
Eficiência de 2ª Lei - TRADICIONAL		1.6	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. KOTAS		1.6	%

TABELA 5.2.2.4.2 Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 1.50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		29.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		25.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		19.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		17.0	C
Temperatura da água de condensação		23.5	C
Vazão da água de condensação		1.4E-07	m ³ /s
Varição de Pressão entre 1 e 2		1.0	kPa
Velocidade do ar		1.5	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1050.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DO PARÂMETRO	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	29.0	19.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	25.0	17.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	23.7	16.0	C
Pressão de Saturação na TBS	4.0	2.2	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.2	1.9	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.9	1.8	kPa
Umidade Absoluta	0.02	0.01	kgv/kg
Umidade Relativa	73.1	82.7	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.96	0.92	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	80.6	50.4	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGETICA			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.028	kg/s
Varição de Umidade		-0.008	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-30.2	kJ/kg
Entalpia da Água (Estado Líquido)		98.3	kJ/kgv
Entalpia da Água (Estado de Vapor)		2554.1	kJ/kgv
Energia calorífica retirada		812.7	J/s
Eficiência de 1ª Lei		77.4	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA			
Entropia da Água (Estado Líquido)		0.34	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)		8.58	kJ/kgv.K
Exergia do Ar de Entrada		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída		37.7	J/s
Exergia da Água		11.2	J/s
Exergia do Sist. de Refrigeração		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo de resfriamento		1001.2	J/s
Eficiência de 2ª Lei - TRADICIONAL		4.6	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. KOTAS		4.6	%

5.2.2.5. Resfriamento do ar por água gelada

TABELA 5.2.2.5.1. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por água gelada com velocidade do ar de 0.25 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W e potencia elétrica consumida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO		VALORES	UNIDADES
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		24.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		21.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		19.0	C
Velocidade do ar		0.25	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1000.0	J/s
Pot. Elet. Req. pelo Bomba Hidráulica		1050.0	J/s
Variação de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	28.0	21.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	24.0	19.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	22.6	18.1	C
Pressão de Saturação na TBS	3.8	2.5	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.0	2.2	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.7	2.1	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.02	0.01	kgv/kgda
Umidade Relativa do ar	72.6	83.5	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.93	m ³ /kgda
Entalpia do Ar Úmido	76.2	57.1	kJ/kgda
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.005	kgda/s
Variação de Umidade		-0.005	kgv/kgda
Variação Entálpica do Ar		-19.2	kJ/kgda
Energia calorífica removida do ar		88.8	J/s
Eficiência de 1ª Lei		4.3	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		4.1	J/s
Exergia das fontes de energia		2050.0	J/s
Irreversibilidades do processo		2045.9	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		0.2	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		0.2	%

TABELA 5.2.2.5.2. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento do ar por água gelada com velocidade do ar de 1.50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W e potencia elétrica consumida pela bomba hidráulica de 1000 W.

DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO		VALORES	UNIDADES
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		31.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		28.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		22.0	C
Velocidade do ar		1.50	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1000.0	J/s
Pot. Elet. Req. pelo Bomba Hidráulica		1000.0	J/s
Varição de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	31.0	25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	28.0	22.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	27.1	20.8	C
Pressão de Saturação na TBS	4.5	3.2	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.8	2.6	kPa
Pressão de Saturação na TPO	3.6	2.5	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.03	0.02	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	80.2	77.8	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.97	0.94	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	95.0	68.1	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.027	kg/s
Varição de Umidade		-0.008	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-26.9	kJ/kg
Energia calorífica removida do ar		732.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei		73.3	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		26.8	J/s
Exergia das fontes de energia		1000.0	J/s
Irreversibilidades do processo		973.2	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		2.7	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		2.7	%

5.2.2.6. Resfriamento evaporativo do ar:

TABELA 5.2.2.6.1. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento evaporativo do ar com velocidade do ar de 0.25 m/s e potencia consumida pela bomba hidráulica de 1025 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		27.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		21.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		21.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		21.0	C
Temperatura da água nos aspersores		21.0	C
Velocidade do ar		0.25	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidrául.		1025.0	J/s
Variação de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	27.0	21.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	21.0	21.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	18.5	21.0	C
Pressão de Saturação na TBS	3.6	2.5	kPa
Pressão de Saturação na TBU	2.5	2.5	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.1	2.5	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.015	0.017	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	59.7	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.93	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	64.1	64.3	kJ/kga
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.005	kga/s
Variação de Umidade		0.002	kgv/kga
Variação Entálpica do Ar		0.2	kJ/kga
Entalpia da água		87.9	kJ/kgv
Energia calorífica removida do ar		1.04	J/s
Eficiência de 1ª Lei		0.1	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		3.8	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1025.0	J/s
Irreversibilidades do processo		1021.3	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		0.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		0.3	%

TABELA 5.2.2.6.2. Resultados do processo psicrométrico de resfriamento evaporativo do ar com velocidade do ar de 1.50 m/s e potencia elétrica consumida pela bomba hidráulica de 1025 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		31.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		26.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		26.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		26.0	C
Temperatura da água nos aspersores		22.0	C
Velocidade do ar		1.50	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidrául.		1025.0	J/s
Variação de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	31.0	26.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	26.0	26.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	24.4	26.0	C
Pressão de Saturação na TBS	4.5	3.4	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.4	3.4	kPa
Pressão de Saturação na TPO	3.1	3.4	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.02	0.02	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	68.2	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.97	0.95	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	85.1	85.3	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.027	kg/s
Variação de Umidade		0.002	kgv/kg
Variação Entálpica do Ar		0.2	kJ/kg
Entalpia da água		92.1	kJ/kg
Energia calorífica removida do ar		5.4	J/s
Eficiência de 1^a Lei		0.5	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		21.5	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1025.0	J/s
Irreversibilidades do processo		1003.5	J/s
Eficiência de 2^a Lei - Tradicional		2.1	%
Eficiência de 2 ^a Lei - T. J. Kotas		2.1	%

5.2.2.7. Mistura adiabática de duas correntes de ar

5.2.2.7.1 - Caso A

TABELA 5.2.2.7.1.1 Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,25 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			47.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			47.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			19.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			23.5	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			22.0	C
Velocidade no ponto 2			0.125	m/s
Velocidade no ponto 3			0.250	m/s
Variação de Pressão no ponto 1			0.5	kPa
Variação de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	47.0	22.0	23.5	C
Temperatura de Bulbo Úmido	47.0	19.0	22.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	47.0	17.6	21.4	C
Pressão de Saturação na TBSC	10.6	2.6	2.9	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	10.6	2.2	2.6	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	10.6	2.0	2.5	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.08	0.01	0.02	kgv/kgda
Umidade Relativa do ar	100.0	76.3	88.2	%
Volume Específico do Ar Úmido	1.11	0.93	0.94	m ³ /kgda
Entalpia do Ar Úmido	253.0	57.0	68.1	kJ/kgda
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.15	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.003	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.002	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.004	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.002	kgda/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.002	kgda/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.005	kgda/s
Energia do ar no ponto 1			589.2	J/s
Energia do ar no ponto 2			135.8	J/s
Energia do ar no ponto 3			320.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei			44.3	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA				
Exergia do ar no ponto 1			26.4	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			1.4	J/s
Irreversibilidade do Processo			25.0	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			5.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			5.6	%

TABELA 5.2.2.7.1.2 Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1.00 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			60.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			60.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			24.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			20.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			36.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			36.0	C
Velocidade no ponto 2			0.50	m/s
Velocidade no ponto 3			1.00	m/s
Varição de Pressão no ponto 1			0.5	kPa
Varição de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	60.0	24.0	36.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	60.0	20.0	36.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	60.0	18.3	36.0	C
Pressão de Saturação na TBSC	19.8	2.9	5.9	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	19.8	2.3	5.9	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	19.8	2.1	5.9	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.17	0.01	0.04	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	100.0	70.3	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	1.30	0.93	1.02	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	497.8	60.5	144.6	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.59	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.01	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.009	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.018	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.008	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.009	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.017	kg/s
Energia do ar no ponto 1			3959.1	J/s
Energia do ar no ponto 2			572.1	J/s
Energia do ar no ponto 3			2516.4	J/s
Eficiência de 1ª Lei			55.5	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA				
Exergia do ar no ponto 1			291.1	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			49.9	J/s
Irreversibilidade do Processo			241.1	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			17.2	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			17,2	%

TABELA 5.2.2.7.1.3. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1.25 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			67.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			67.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			20.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			38.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			38.0	C
Velocidade no ponto 2			0.63	m/s
Velocidade no ponto 3			1.25	m/s
Varição de Pressão no ponto 1			0.50	kPa
Varição de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	67.0	25.0	38.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	67.0	20.0	38.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	67.0	17.8	38.00	C
Pressão de Saturação na TBSC	27.1	3.2	6.6	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	27.1	2.3	6.6	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	27.1	2.0	6.6	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.25	0.01	0.05	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	100.0	64.3	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	1.47	0.94	1.03	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	736.0	60.5	160.2	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.81	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.01	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.01	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.02	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.01	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.01	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.02	kg/s
Energia do ar no ponto 1			7113.9	J/s
Energia do ar no ponto 2			712.8	J/s
Energia do ar no ponto 3			3435.1	J/s
Eficiência de 1ª Lei			43.9	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA				
Exergia do ar no ponto 1			659.3	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			82.6	J/s
Irreversibilidade do Processo			576.7	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			12.5	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			12,5	%

5.2.2.7.2 - Caso B

TABELA 5.2.2.7.2.1 Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,50 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			1.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			-1.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			33.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			28.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			21.5	C
Velocidade no ponto 2			0.37	m/s
Velocidade no ponto 3			0.50	m/s
Varição de Pressão no ponto 1			0.75	kPa
Varição de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	1.0	33.0	23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	-1.0	28.0	21.5	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	-11.7	26.6	20.9	C
Pressão de Saturação na TBSC	0.7	5.0	2.8	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	0.6	3.8	2.6	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	0.2	3.5	2.5	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.003	0.024	0.017	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	70.1	69.2	88.1	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.85	0.98	0.94	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	8.7	94.9	66.2	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.13	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.002	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.007	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.009	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.003	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.007	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.009	kg/s
Energia do ar no ponto 1			24.1	J/s
Energia do ar no ponto 2			634.4	J/s
Energia do ar no ponto 3			625.1	J/s
Eficiência de 1ª Lei			94.9	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA				
Exergia do ar no ponto 1			12.8	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			5.5	J/s
Irreversibilidade do Processo			7.2	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			43.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			43,3	%

TABELA 5.2.2.7.2.2 Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 0,75 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			0.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			-2.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			31.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			26.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			20.0	C
Velocidade no ponto 2			0.55	m/s
Velocidade no ponto 3			0.75	m/s
Varição de Pressão no ponto 1			0.75	kPa
Varição de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	0.0	31.0	22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	-2.0	26.0	20.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	-11.8	24.4	19.1	C
Pressão de Saturação na TBSC	0.6	4.4	2.6	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	0.5	3.4	2.3	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	0.2	3.1	2.2	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.003	0.021	0.015	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	67.5	68.2	83.9	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.84	0.97	0.93	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	6.9	85.1	60.6	kJ/kga
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.20	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.004	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.009	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.013	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.004	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.010	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.014	kg/s
Energia do ar no ponto 1			29.2	J/s
Energia do ar no ponto 2			855.5	J/s
Energia do ar no ponto 3			863.7	J/s
Eficiência de 1ª Lei			97.6	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA				
Exergia do ar no ponto 1			17.8	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			7.3	J/s
Irreversibilidade do Processo			10.5	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			41.2	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			41,2	%

TABELA 5.2.2.7.2.3. Resultados do processo psicrométrico de mistura adiabática com velocidade do ar de saída de 1,50 m/s.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1			9.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1			6.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2			33.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2			30.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 3			20.5	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 3			20.0	C
Velocidade no ponto 2			0.75	m/s
Velocidade no ponto 3			1.50	m/s
Varição de Pressão no ponto 1			0.75	kPa
Varição de Pressão no ponto 3			0.25	kPa
RESULTADOS DO CALCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	PONTO 1	PONTO 2	MISTURA	
Temperatura de Bulbo Seco	9.0	33.0	20.5	C
Temperatura de Bulbo Úmido	6.0	30.0	20.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	2.9	29.2	19.8	C
Pressão de Saturação na TBSC	1.1	5.0	2.4	kPa
Pressão de Saturação na TBUC	0.9	4.2	2.3	kPa
Pressão de Saturação na TPOC	0.8	4.1	2.3	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.005	0.028	0.016	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	65.7	80.8	95.7	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.87	0.98	0.93	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	21.8	105.7	60.6	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Velocidade no ponto 1			0.75	m/s
Vazão do Ar no ponto 1			0.01	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 2			0.01	m ³ /s
Vazão do Ar no ponto 3			0.03	m ³ /s
Fluxo Mássico no ponto 1			0.02	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 2			0.01	kg/s
Fluxo Mássico no ponto 3			0.03	kg/s
Energia do ar no ponto 1			330.8	J/s
Energia do ar no ponto 2			1422.8	J/s
Energia do ar no ponto 3			1735.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei			98.9	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA				
Exergia do ar no ponto 1			56.9	J/s
Exergia do ar no ponto 2			0.0	J/s
Exergia do ar no ponto 3			27.9	J/s
Irreversibilidade do Processo			28.9	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			49.1	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			50.9	%

5.2.3. Estudos de casos:

5.2.3.1. Produto Perecível

5.2.3.1.1. Conservação de produto perecível via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado realizado entre 27/3 e 26/4/96

TABELA 5.2.3.1.1.1. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 0.50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		17.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		10.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		10.0	C
Temperatura da Água de Condensação		14.0	C
Vazão da Água de Condensação		7.9E-08	m ³ /s
Varição de Pressão entre 1 e 2		1.0	kPa
Velocidade do ar		0.5	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1050.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DO PARÂMETRO	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	10.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	17.0	10.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	14.4	10.0	C
Pressão de Saturação na TBS	2.6	1.2	kPa
Pressão de Saturação na TBU	1.9	1.2	kPa
Pressão de Saturação na TPO	1.6	1.2	kPa
Umidade Absoluta	0.011	0.008	kgv/kg
Umidade Relativa	61.9	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.88	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	50.4	30.9	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.009	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.01	kg/s
Varição de Umidade		-0.003	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-19.4	kJ/kg
Entalpia da água (Estado Líquido)		62.9	kJ/kgv
Entalpia da água (Estado de Vapor)		2541.8	kJ/kgv
Energia calorífica retirada		183.8	J/s
Eficiência de 1ª Lei		17.5	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA			
Entropia da Água (Estado Líquido)		0.23	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)		8.61	kJ/kgv.K
Exergia do Ar de Entrada		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída		11.8	J/s
Exergia da Água		4.7	J/s
Exergia do Sist. de Refrig.		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo de resfriamento		1033.4	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		1.6	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		1.6	%

TABELA 5.2.3.1.1.2. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 1.00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		22.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		22.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		12.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		10.0	C
Temperatura da Água de Condensação		21.0	C
Vazão da Água de Condensação		7.9E-08	m ³ /s
Varição de Pressão entre 1 e 2		1.0	kPa
Velocidade do ar		1.5	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1050.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DO PARÂMETRO	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	12.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	22.0	10.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	22.0	8.5	C
Pressão de Saturação na TBS	2.6	1.4	kPa
Pressão de Saturação na TBU	2.6	1.2	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.6	1.1	kPa
Umidade Absoluta	0.018	0.008	kgv/kg
Umidade Relativa	100.0	78.9	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.93	0.89	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	68.2	30.9	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.028	kg/s
Varição de Umidade		-0.01	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-37.3	kJ/kg
Entalpia da água (Estado Líquido)		87.9	kJ/kgv
Entalpia da água (Estado de Vapor)		2541.8	kJ/kgv
Energia calorífica retirada		1030.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei		98.2	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA			
Entropia da Água (Estado Líquido)		0.31	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)		8.61	kJ/kgv.K
Exergia do Ar de Entrada		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída		46.4	J/s
Exergia da Água		-0.3	J/s
Exergia do Sist. de Refrig.		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo de resfriamento		1003.8	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		4.4	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		4.4	%

TABELA 5.2.3.1.1.3. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com velocidade do ar de 2.00 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1000 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		17.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		17.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		10.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Saída		8.0	C
Temperatura da Água de Condensação		16.0	C
Vazão da Água de Condensação		7.9E-08	m ³ /s
Varição de Pressão entre 1 e 2		1.0	kPa
Velocidade do ar		2.0	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		1000.0	J/s
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DO PARÂMETRO	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	17.0	10.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	17.0	8.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	17.0	6.3	C
Pressão de Saturação na TBS	1.9	1.2	kPa
Pressão de Saturação na TBU	1.9	1.1	kPa
Pressão de Saturação na TPO	1.9	0.9	kPa
Umidade Absoluta	0.013	0.006	kgv/kg
Umidade Relativa	100.0	77.6	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.91	0.88	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	50.5	26.2	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.04	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.04	kg/s
Varição de Umidade		-0.007	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-24.3	kJ/kg
Entalpia da água (Estado Líquido)		67.1	kJ/kgv
Entalpia da água (Estado de Vapor)		2533.0	kJ/kgv
Energia calorífica retirada		923.5	J/s
Eficiência de 1^a Lei		92.3	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA			
Entropia da Água (Estado Líquido)		0.24	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)		8.7	kJ/kgv.K
Exergia do Ar de Entrada		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída		49.3	J/s
Exergia da Água		-0.9	J/s
Exergia do Sist. de Refrig.		1000.0	J/s
Irreversibilidade do processo de resfriamento		951.8	J/s
Eficiência de 2^a Lei - Tradicional		4.8	%
Eficiência de 2 ^a Lei - T. J. Kotas		4.8	%

TABELA 5.2.3.1.1.4. Resultados das análises de $^{\circ}$ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO					
TIPO		VERDE			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T
27/03/1996		4,80	3,94	0,61	5,60	3,99	0,66
29/03/1996		4,80	3,93	0,58	5,00	3,99	0,60
01/04/1996		4,80	3,97	0,69	5,20	4,10	0,59
03/04/1996		4,80	3,99	0,61	5,00	4,12	0,51
08/04/1996		4,40	4,07	0,53	5,00	4,22	0,47
10/04/1996		4,60	4,09	0,53	5,00	4,29	0,42
12/04/1996		4,80	4,14	0,50	5,00	4,31	0,41
15/04/1996		4,60	4,13	0,51	5,20	4,32	0,37
17/04/1996		5,00	4,12	0,46	5,10	4,32	0,41
19/04/1996		4,90	4,14	0,44	5,00	4,22	0,45
22/04/1996		5,00	4,19	0,46	5,00	4,29	0,39
24/04/1996		4,20	4,25	0,42	5,00	4,28	0,49
26/04/1996		4,40	4,14	0,48	5,00	4,31	0,40

TABELA 5.2.3.1.1.5. Resultados das análises de $^{\circ}$ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação na geladeira a 6° C.

LOCAL		AMBIENTE (GELADEIRA A 6° C)					
TIPO		VERDE			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T
27/03/1996		4,80	3,94	0,61	5,60	3,99	0,66
29/03/1996		4,40	3,91	0,59	5,00	3,97	0,60
01/04/1996		5,00	3,81	0,80	6,00	3,91	0,72
03/04/1996		5,00	3,96	0,69	5,20	3,94	0,77
08/04/1996		5,00	3,94	0,67	5,40	3,99	0,71
10/04/1996		5,00	3,90	0,73	5,60	3,98	0,62
12/04/1996		5,00	3,92	0,78	5,00	4,00	0,70
15/04/1996		4,60	3,92	0,81	5,00	4,03	0,57
17/04/1996		5,00	3,96	0,62	5,60	4,06	0,66
19/04/1996		5,00	3,91	0,70	5,70	3,96	0,72
22/04/1996		4,20	3,97	0,69	4,70	4,04	0,64
24/04/1996		4,20	4,02	0,64	5,00	4,11	0,59
26/04/1996		4,60	3,98	0,72	4,90	4,12	0,59

TABELA 5.2.3.1.1.6. Resultados das análises de ° BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

LOCAL		AMBIENTE (SIGEP)					
TIPO		VERDE			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T
27/03/1996		4,80	3,94	0,61	5,60	3,99	0,66
29/03/1996		4,90	3,86	0,66	5,40	3,98	0,59
01/04/1996		5,00	3,89	0,87	5,00	3,89	0,76
03/04/1996		4,80	3,89	0,79	5,20	4,01	0,66
08/04/1996		4,80	3,88	0,70	5,00	4,05	0,55
10/04/1996		5,00	3,96	0,55	5,20	4,11	0,53
12/04/1996		4,80	4,03	0,53	5,80	4,09	0,64
15/04/1996		4,80	4,03	0,48	5,20	4,03	0,63
17/04/1996		4,90	4,01	0,54	5,00	4,03	0,58
19/04/1996		4,90	3,98	0,56	5,00	4,03	0,55
22/04/1996		4,90	3,96	0,62	5,80	4,10	0,61
24/04/1996		4,30	4,06	0,57	4,90	4,08	0,57
26/04/1996		4,60	4,03	0,58	5,00	4,12	0,54

TABELA 5.2.3.1.1.7. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação utilizando os três tratamentos diferentes.

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO		GELADEIRA A 6 ° C		SIGEP	
TIPO		VERDE	COLORIDO	VERDE	COLORIDO	VERDE	COLORIDO
DATA	Parâmetro	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)
27/03/1996		92,56	93,20	92,56	93,20	92,56	93,20
09/04/1996		93,18	93,01	93,39	92,95	93,26	93,20
26/04/1996		90,98	92,66	93,59	92,66	93,44	93,84

5.2.3.1.2. Conservação do produto perecível através do resfriamento do ar por água gelada realizado entre 29/4 e 13/5/96.

TABELA 5.2.3.1.2.1. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por água gelada, com velocidade do ar de 1.25 m/s e, potências elétricas requeridas pelo sistema de refrigeração de 975 W e pela bomba hidráulica de 1075 W.

DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO		VALORES	UNIDADES
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		30.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		24.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		23.0	C
Velocidade do ar		1.25	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		975.0	J/s
Pot. Elet. Req. pelo Bomba Hidráulica		1075.0	J/s
Variação de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	30.0	23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	24.0	23.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	21.9	23.0	C
Pressão de Saturação na TBS	4.2	2.8	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.0	2.8	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.6	2.8	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.018	0.019	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	61.9	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.96	0.94	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	76.2	72.2	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.022	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.023	kg/s
Variação de Umidade		0.001	kgv/kg
Variação Entálpica do Ar		-4.0	kJ/kg
Energia calorífica removida do ar		91.2	J/s
Eficiência de 1ª Lei		4.5	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		18.7	J/s
Exergia das fontes de energia		2050.0	J/s
Irreversibilidades do processo		2031.3	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		0.9	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		0.9	%

TABELA 5.2.3.1.2.2. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do processo de resfriamento do ar por água gelada, com velocidade do ar de 1.30 m/s e, potências elétricas requeridas pelo sistema de refrigeração de 900 W e pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO		VALORES	UNIDADES
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		21.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		15.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		15.0	C
Velocidade do ar		1.3	m/s
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Refrig.		900.0	J/s
Pot. Elet. Req. pelo Bomba Hidráulica		1050.0	J/s
Variação de Pressão entre 1 e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	28.0	15.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	21.0	15.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	18.0	15.0	C
Pressão de Saturação na TBS	3.8	1.7	kPa
Pressão de Saturação na TBU	2.5	1.7	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.1	1.7	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.014	0.012	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	54.7	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.90	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	64.1	44.4	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.02	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.02	kg/s
Variação de Umidade		-0.002	kgv/kg
Variação Entálpica do Ar		-19.7	kJ/kg
Energia calorífica removida do ar		479.3	J/s
Eficiência de 1ª Lei		24.6	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do Ar de Saída (ponto 2)		25.4	J/s
Exergia das fontes de energia		1950.0	J/s
Irreversibilidades do processo		1924.6	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		1.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		1.3	%

TABELA 5.2.3.1.2.3. Resultados das análises de $^{\circ}$ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO								
TIPO		VERDE			MÉDIO			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T
29/04/1996		4,60	3,80	0,67	4,90	3,89	0,72	5,60	3,86	0,76
02/05/1996		5,10	3,93	0,72	5,00	4,00	0,64	5,40	3,98	0,69
03/05/1996		4,90	3,83	0,65	5,20	3,95	0,60	5,10	4,05	0,61
06/05/1996		5,00	3,94	0,61	5,00	3,97	0,61	5,00	3,99	0,59
08/05/1996		5,20	4,11	0,71	4,90	4,13	0,54	5,40	4,15	0,62
10/05/1996		4,60	4,24	0,54	5,20	4,25	0,50	5,40	4,17	0,52
13/05/1996		4,90	4,03	0,58	5,40	4,07	0,48	5,40	4,19	0,45

TABELA 5.2.3.1.2.4. Resultados das análises de $^{\circ}$ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente de geladeira a 6° C.

LOCAL		AMBIENTE (GELADEIRA A 6° C)					
TIPO		VERDE			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T
29/04/1996		4,60	3,80	0,67	5,60	3,86	0,76
02/05/1996		4,80	3,83	0,77	5,60	4,01	0,66
03/05/1996		4,60	3,76	0,73	5,00	3,86	0,73
06/05/1996		4,80	3,79	0,73	5,40	3,91	0,75
08/05/1996		4,90	3,75	0,88	5,00	3,92	0,83
10/05/1996		4,90	3,95	0,66	5,20	4,00	0,72
13/05/1996		4,80	3,85	0,73	5,40	3,91	0,71

TABELA 5.2.3.1.2.5. Resultados das análises de $^{\circ}$ BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com o processo de resfriamento do ar por água gelada.

LOCAL		AMBIENTE SIGEP								
TIPO		VERDE			MÉDIO			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T	$^{\circ}$ Brix	pH	A T
29/04/1996		4,60	3,80	0,67	4,90	3,89	0,72	5,60	3,86	0,76
02/05/1996		4,40	3,87	0,72	5,00	3,92	0,72	5,40	4,01	0,65
03/05/1996		4,20	3,89	0,64	5,00	3,90	0,65	5,00	4,00	0,52
06/05/1996		5,60	3,92	0,68	5,60	3,98	0,59	6,00	4,00	0,63
08/05/1996		5,00	4,09	0,56	4,60	4,04	0,64	5,00	4,21	0,55
10/05/1996		4,80	4,09	0,57	5,00	4,16	0,59	5,60	4,21	0,56
13/05/1996		4,70	4,04	0,48	5,00	4,08	0,48	5,10	4,13	0,47

TABELA 5.2.3.1.2.6. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, para os tratamentos ambiente externo e SIGEP, e estágio de maturação verde e colorido para o tratamento em geladeira, obtidos durante o processo de conservação.

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO			GELADEIRA A 6 $^{\circ}$ C			SIGEP		
TIPO		VERDE	MÉDIO	COLORIDO	VERDE	COLORIDO	VERDE	MÉDIO	COLORIDO	
DATA	Parâmetro	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	
29/04/1996		93,66	93,34	92,42	93,66	92,42	93,66	93,34	92,42	
02/05/1996		92,33	92,59	92,92	92,71	92,59	93,21	93,18	92,94	
09/05/1996		92,14	92,30	92,24	93,12	92,55	93,01	93,33	92,46	

5.2.3.1.3. Conservação do produto perecível via resfriamento evaporativo do ar realizado entre 15/5 e 29/5/96.

TABELA 5.2.3.1.3.1. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		15.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		15.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		15.0	C
Temperatura da água nos aspersores		15.0	C
Velocidade do ar		1.50	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidraul.		1050.0	J/s
Variacao de Pressão entre 1e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	28.0	15.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	15.0	15.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	5.8	15.0	C
Pressão de Saturação na TBS	3.8	1.7	kPa
Pressão de Saturação na TBU	1.7	1.7	kPa
Pressão de Saturação na TPO	0.9	1.7	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.006	0.012	kgv/kgv
Umidade Relativa do ar	24.4	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.94	0.90	m ³ /kgv
Entalpia do Ar Úmido	44.0	44.4	kJ/kgv
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.028	kgv/s
Varição de Umidade		-0.006	kgv/kgv
Varição Entálpica do Ar		-0.4	kJ/kgv
Entalpia da Água		62.9	kJ/kgv
Energia calorífica removida do ar		9.6	J/s
Eficiência de 1ª Lei		0.9	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do ar de saída (ponto 2)		35.9	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo		1014.0	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		3.4	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		3.4	%

TABELA 5.2.3.1.3.2. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 2,00 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		12.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		12.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		12.0	C
Temperatura da água nos aspersores		12.0	C
Velocidade do ar		2.0	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidraul.		1050.0	J/s
Variacao de Pressão entre 1e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	23.0	12.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	12.0	12.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	2.6	12.0	C
Pressão de Saturação na TBS	2.8	1.4	kPa
Pressão de Saturação na TBU	1.4	1.4	kPa
Pressão de Saturação na TPO	0.74	1.4	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.005	0.01	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	26.3	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.89	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	35.8	36.0	kJ/kga
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.03	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.04	kga/s
Varição de Umidade		-0.005	kgv/kga
Varição Entálpica do Ar		-0.2	kJ/kga
Entalpia da Água		50.4	kJ/kgv
Energia calorífica removida do ar		8.7	J/s
Eficiência de 1ª Lei		0.8	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do ar de saída (ponto 2)		43.7	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo		1006.4	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		4.2	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		4.2	%

TABELA 5.2.3.1.3.3. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1150 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		30.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		23.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		23.0	C
Temperatura da água nos aspersores		23.0	C
Velocidade do ar		1.5	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidraul.		1150.0	J/s
Variacao de Pressão entre 1e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	30.0	23.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	23.0	23.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	20.3	23.0	C
Pressão de Saturação na TBS	4.2	2.8	kPa
Pressão de Saturação na TBU	2.8	2.8	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.4	2.8	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.016	0.019	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	56.3	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.96	0.94	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	71.9	72.2	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.028	kg/s
Varição de Umidade		-0.003	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-0.3	kJ/kg
Entalpia da Água		96.3	kJ/kgv
Energia calorífica removida do ar		7.9	J/s
Eficiência de 1ª Lei		0.7	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGETICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do ar de saída (ponto 2)		23.3	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1150.0	J/s
Irreversibilidade do processo		1126.7	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		2.0	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		2.0	%

TABELA 5.2.3.1.3.4. Resultados da conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento evaporativo do ar, com velocidade do ar de 2,00 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1050 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 1		28.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 1		24.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ponto 2		24.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ponto 2		24.0	C
Temperatura da água nos aspersores		24.0	C
Velocidade do ar		2.0	m/s
Pot. Elet. Req. pela Bomba Hidraul.		1050.0	J/s
Variacao de Pressão entre 1e 2		0.75	kPa
RESULTADOS DO CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS:			
NOME DA VARIÁVEL	AR DE ENTRADA	AR DE SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	28.0	24.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	24.0	24.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	22.6	24.0	C
Pressão de Saturação na TBS	3.8	3.0	kPa
Pressão de Saturação na TBU	3.0	3.0	kPa
Pressão de Saturação na TPO	2.7	3.0	kPa
Umidade Absoluta do ar	0.019	0.021	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	72.6	100.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.95	0.94	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	76.2	76.4	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA:			
Área do Duto		0.018	m ²
Vazão do Ar		0.035	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar		0.037	kg/s
Varição de Umidade		-0.002	kgv/kg
Varição Entálpica do Ar		-0.2	kJ/kg
Entalpia da Água		100.4	kJ/kg
Energia calorífica removida do ar		6.3	J/s
Eficiência de 1ª Lei		0.6	%
Eficiência Psicrométrica		100.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA:			
Exergia do ar ambiente (ponto 1)		0.0	J/s
Exergia do ar de saída (ponto 2)		27.9	J/s
Exergia da fonte de resfriamento		1050.0	J/s
Irreversibilidade do processo		1022.0	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional		2.6	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas		2.6	%

TABELA 5.2.3.1.3.5. Resultados das análises de °BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente externo.

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO								
TIPO		VERDE			MÉDIO			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T
15/05/1996		4,70	3,82	0,70	4,90	3,70	0,88	5,10	3,71	0,84
17/05/1996		4,70	3,74	0,68	4,90	3,58	0,80	5,10	3,74	0,89
20/05/1996		4,90	4,10	0,79	4,40	3,88	0,81	5,00	3,99	0,71
23/05/1996		5,00	3,85	0,72	4,60	3,76	0,68	6,00	3,94	0,67
26/05/1996		4,80	3,77	0,75	4,50	3,73	0,75	5,80	3,95	0,70
29/05/1996		4,70	3,68	0,70	4,90	3,67	0,79	6,00	3,86	0,64
01/06/1996		5,00	3,73	0,79	5,70	3,80	0,67	5,80	3,96	0,53

TABELA 5.2.3.1.3.6. Resultados das análises de °BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação em ambiente de geladeira a 6 ° C.

LOCAL		AMBIENTE (GELADEIRA A 6 ° C)								
TIPO		VERDE			MÉDIO			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T
15/05/1996		4,70	3,82	0,70	4,90	3,70	0,88	5,10	3,71	0,84
17/05/1996		4,70	3,69	0,68	4,90	3,67	0,84	5,10	3,71	0,79
20/05/1996		4,40	3,81	0,83	5,00	3,84	1,00	5,10	3,74	0,95
23/05/1996		4,20	3,79	0,60	4,70	3,71	0,77	4,80	3,81	0,70
26/05/1996		5,00	3,74	0,70	5,10	3,72	0,75	5,00	3,69	0,80
29/05/1996		4,90	3,62	0,66	5,00	3,65	0,71	5,60	3,68	0,68
01/06/1996		4,90	3,71	0,65	5,00	3,74	0,73	5,30	3,74	0,71

TABELA 5.2.3.1.3.7. Resultados das análises de °BRIX, pH e Acidez Titulável - AT (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação no SIGEP com o processo de resfriamento evaporativo do ar.

LOCAL		AMBIENTE SIGEP								
TIPO		VERDE			MÉDIO			COLORIDO		
DATA	Parâmetro	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T	°Brix	pH	A T
15/05/1996		4,70	3,82	0,70	4,90	3,70	0,88	5,10	3,71	0,84
17/05/1996		4,80	3,77	0,66	5,00	3,72	0,77	5,20	3,77	0,75
20/05/1996		4,80	3,97	0,78	5,00	3,90	0,88	5,20	3,84	0,83
23/05/1996		4,90	3,92	0,55	6,00	3,76	0,87	5,60	3,88	0,71
26/05/1996		4,40	3,88	0,62	5,00	3,81	0,69	4,80	3,78	0,80
29/05/1996		4,90	3,76	0,71	5,00	3,67	0,85	5,30	3,87	0,71
01/06/1996		4,80	3,81	0,78	5,70	3,89	0,72	5,40	3,86	0,67

TABELA 5.2.3.1.3.8. Resultados das análises de Umidade em base úmida (%) para o produto perecível: tomate cereja, nos estádios de maturação verde, médio e colorido, obtidos durante o processo de conservação nos três tratamentos distintos

LOCAL		AMBIENTE EXTERNO			GELADEIRA A 6 °C			SIGEP		
TIPO		VERDE	MÉDIO	COLORIDO	VERDE	MÉDIO	COLORIDO	VERDE	MÉDIO	COLORIDO
DATA	Parâmetro	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)	U _{B.U.} (%)
15/05/1996		93,02	92,91	92,41	93,02	92,91	92,41	93,02	92,91	92,41
23/05/1996		92,38	92,57	91,79	91,99	92,46	91,72	93,15	92,23	92,14
29/05/1996		91,83	92,48	91,54	92,14	92,17	92,10	92,41	92,79	91,53

5.2.3.2. Produto Deteriorável:

5.2.3.2.1. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, a altas vazões, realizado em 31/5/96.

TABELA 5.2.3.2.1.1. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		21.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		17.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido		39.0	C	
Variação de Pressão entre os Pontos 1 e 3		0.5	kPa	
Velocidade do Ar		3.5	m/s	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		33.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.		2298.0	J/s	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	21.0	39.0	33.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	17.0	22.8	22.8	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	14.9	14.9	18.7	C
Umidade Absoluta do ar	0.012	0.012	0.015	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	68.2	24.3	43.0	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.98	0.96	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	50.4	68.9	71.0	kJ/kga
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Área do Duto		0.018	m ²	
Vazão do Ar		0.062	m ³ /s	
Variação de Umidade do Ar		0.003	kgv/kga	
Fluxo Mássico do Ar		0.063	kg/s	
Vapor removido na secagem		.00020	kgv/s	
Variação Entálpica entre 1 e 2		18.5	kJ/kg	
Energia resultante (1-3)		1697.2	J/s	
Eficiência de 1ª Lei		73.9	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA-AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1		0.0	J/s	
Exergia do Ponto 2		65.4	J/s	
Exergia do Ponto 3		19.9	J/s	
Exergia da fonte de aquecimento		2298.0	J/s	
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)		2232.6	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)		2.8	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)		2.8	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA-SECAGEM				
Entalpia da água removida		2407.204	kJ/kgv	
Variação Entrópica da Água Evaporada na Secagem		-8.2739	kJ/kgv.K	
Exergia da Água removida na secagem		3280.651	J/s	
Irreversibilidade na secagem (2-3)		3326.127	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)		0.5962	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)		1.3862	%	

TABELA 5.2.3.2.1.2. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		22.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		18.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido		36.0	C	
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 3		0.5	kPa	
Velocidade do Ar		3.5	m/s	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		34.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.		2298.0	J/s	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	36.0	34.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	18.0	22.5	22.5	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	16.0	16.0	17.7	C
Umidade Absoluta do ar	0.012	0.012	0.014	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	68.9	30.7	38.2	%
Volume Especifico do Ar Úmido	0.93	0.97	0.97	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	53.6	68.0	69.7	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Área do Duto			0.018	m ²
Vazão do Ar			0.062	m ³ /s
Varição de Umidade do Ar			0.001	kgv/kg
Fluxo Mássico do Ar			0.064	kg/s
Vapor removido na secagem			.00009	kgv/s
Varição Entálpica entre 1 e 2			14.4	kJ/kg
Energia resultante (1-3)			1155.5	J/s
Eficiência de 1ª Lei			50.3	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA-AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1			0.0	J/s
Exergia do Ponto 2			51.8	J/s
Exergia do Ponto 3			17.2	J/s
Exergia da fonte de aquecimento			2298.0	J/s
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)			2246.2	J/s
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)			2.3	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)			2.3	%
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA-SECAGEM				
Entalpia da água removida			2414.6	kJ/kgv
Varição Entrópica da Água Evaporada na Secagem			-8.3	kJ/kgv.K
Exergia da Água removida na secagem			1491.7	J/s
Irreversibilidade na secagem (2-3)			1526.3	J/s
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)			1.1	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)			2.3	%

TABELA 5.2.3.2.1.3. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		22.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		17.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido		36.0	C	
Variação de Pressão entre os Pontos 1 e 3		0.5	kPa	
Velocidade do Ar		3.5	m/s	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		30.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.		2298.0	J/s	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	36.0	30.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	17.0	21.7	21.7	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	14.4	14.4	18.2	C
Umidade Absoluta do ar	0.011	0.011	0.014	kgv/kga
Umidade Relativa do ar	61.9	27.6	49.2	%
Volume Especifico do Ar Úmido	0.92	0.97	0.95	m ³ /kga
Entalpia do Ar Úmido	50.4	64.7	66.6	kJ/kga
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Área do Duto		0.018	m ²	
Vazão do Ar		0.062	m ³ /s	
Variação de Umidade do Ar		0.003	kgv/kga	
Fluxo Mássico do Ar		0.064	kga/s	
Vapor removido na secagem		.0002	kgv/s	
Variação Entálpica entre 1 e 2		14.3	kJ/kg	
Energia resultante (1-3)		1434.4	J/s	
Eficiência de 1ª Lei		62.4	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA-AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1		0.0	J/s	
Exergia do Ponto 2		51.7	J/s	
Exergia do Ponto 3		10.9	J/s	
Exergia da fonte de aquecimento		2298.0	J/s	
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)		2246.3	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)		2.3	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)		2.3	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA-SECAGEM				
Entalpia da água removida		2414.6	kJ/kgv	
Variação Entrópica da Água Evaporada na Secagem		-8.3	kJ/kgv.K	
Exergia da Água removida na secagem		3261.5	J/s	
Irreversibilidade na secagem (2-3)		3302.3	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)		0.3	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)		1.3	%	

TABELA 5.2.3.2.1.4. Resultados da conservação do produto deteriorável: sementes de soja; utilizando o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade média do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de 2298 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		22.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		17.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido		39.0	C	
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 3		0.5	kPa	
Velocidade do Ar		3.5	m/s	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		31.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.		2298.0	J/s	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	22.0	39.0	31.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	17.0	22.5	22.5	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	14.4	14.4	19.2	C
Umidade Absoluta do ar	0.011	0.011	0.015	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	61.9	23.4	49.5	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.98	0.96	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	50.4	67.8	70.0	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Área do Duto		0.018	m ²	
Vazão do Ar		0.062	m ³ /s	
Varição de Umidade do Ar		0.004	kgv/kg	
Fluxo Mássico do Ar		0.063	kg/s	
Vapor removido na secagem		.0003	kgv/s	
Varição Entálpica entre 1 e 2		17.5	kJ/kg	
Energia resultante (1-3)		1769.9	J/s	
Eficiência de 1ª Lei		77.0	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA-AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1		0.0	J/s	
Exergia do Ponto 2		61.6	J/s	
Exergia do Ponto 3		14.9	J/s	
Exergia da fonte de aquecimento		2298.0	J/s	
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)		2236.4	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)		2.7	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)		2.7	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGÉTICA-SECAGEM				
Entalpia da água removida		2407.2	kJ/kgv	
Varição Entrópica da Água Evaporada na Secagem		-8.3	kJ/kgv.K	
Exergia da Água removida na secagem		4145.8	J/s	
Irreversibilidade na secagem (2-3)		4192.4	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)		0.4	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)		1.1	%	

TABELA 5.2.3.2.1.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B.U.1}$ (%)	$U_{B.U.2}$ (%)	$U_{B.U.3}$ (%)	MÉDIA
01		17,85	17,45	17,26	17,52
03		16,37	16,33	16,23	16,31
04		18,25	18,09	18,00	18,11

TABELA 5.2.3.2.1.6. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B.U.1}$ (%)	$U_{B.U.2}$ (%)	$U_{B.U.3}$ (%)	MÉDIA
01		17,85	17,45	17,26	17,52
03		16,37	16,33	16,23	16,31
04		18,25	18,09	18,00	18,11

TABELA 5.2.3.2.1.7. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B.U.1}$ (%)	$U_{B.U.2}$ (%)	$U_{B.U.3}$ (%)	MÉDIA
01		11,70	11,68	11,73	11,70
03		11,72	11,81	11,74	11,76
04		12,67	12,65	12,58	12,63

TABELA 5.2.3.2.1.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
01	84,00	92,00	92,00	100,00	92,00
03	92,00	94,00	84,00	92,00	90,50
04	92,00	96,00	100,00	92,00	95,00

TABELA 5.2.3.2.1.9. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1° C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
01	90,00	92,00	86,00	82,00	87,50
03	96,00	72,00	80,00	80,00	82,00
04	92,00	90,00	88,00	92,00	90,50

TABELA 5.2.3.2.1.10. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
01	88,00	88,00	86,00	80,00	87,00
03	84,00	76,00	84,00	80,00	81,00
04	80,00	76,00	92,00	84,00	83,00

TABELA 5.2.3.2.1.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
01	64,00	76,00	72,00	76,00	72,00
03	68,00	84,00	52,00	76,00	70,00
04	68,00	68,00	92,00	56,00	71,00

TABELA 5.2.3.2.1.12. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
01	60,00	40,00	64,00	56,00	55,00
03	60,00	60,00	56,00	60,00	59,00
04	60,00	76,00	56,00	64,00	64,00

TABELA 5.2.3.2.1.13. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 1, 3 e 4; utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com altas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
01	24,00	36,00	52,00	32,00	36,00
03	20,00	12,00	24,00	8,00	16,00
04	24,00	12,00	20,00	28,00	21,00

5.2.3.2.2. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, realizado em 5/6/96.

TABELA 5.2.3.2.2.1. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, por resfriamento por expansão direta, com $v_{max} = 3,00$ m/s e potência consumida pelo sistema de 1000 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco da Entrada		19.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido da Entrada		16.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar resfriado e desumidificado		16.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do ar resfriado e desumidificado		12.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar após a secagem do produto		15.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do ar após a secagem do produto		12.0	C	
Temperatura da Água de Condensação		14.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de resfriamento		1000.0	J/s	
Velocidade do ar		3.0	m/s	
Vazão da Água de Condensação		1.9E-07	m ³ /s	
Varição de Pressão entre os pontos 1 e 2		0.75	kPa	
Varição de Pressão entre os pontos 2 e 3		0.25	kPa	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	RESFRIADO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	19.0	16.0	15.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	16.0	12.0	12.0	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	14.4	9.2	9.9	C
Umidade Absoluta do ar	0.0111	0.0078	0.0082	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	74.5	63.9	71.7	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.91	0.90	0.89	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	47.3	35.9	35.9	kJ/kg
RESULTADOS DO CALCULO DO BALANCO ENERGETICO ENTRE 1 E 2 e ENTRE 2 E 3:				
Fluxo Mássico do ar			0.058	kg/s
Varição de Umidade de 1 a 2			0.003	kgv/kg
Varição de entálpica de 1 a 2			11.4	kJ/kg
Entalpia da Água de condensação			58.8	kJ/kgv
Varição Energética entre 1 e 2			646.6	J/s
Eficiência de 1ª Lei			64.7	%
Varição de Umidade de 2 a 3			0.0004	kgv/kg
Vapor de água removido durante a secagem			.00003	kgv/s
Entalpia da Água adicionada ao ar na secagem			2468.4	kJ/kgv
Varição Energética entre 2 e 3			60.4	J/s
RESULTADOS DO CALCULO DO BALANCO EXERGETICO ENTRE 1 E 2 e ENTRE 2 E 3:				
Exergia no ponto 1			0.0	J/s
Exergia no ponto 2			44.5	J/s
Exergia da fonte de Resfriamento			1000.0	J/s
Fluxo de Água de Condensação			.00019	kgv/s
Exergia da Água de Condensação			8.4	J/s
Irreversibilidade no processo			947,2	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			5.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			5.3	%
Exergia no ponto 3			17.9	J/s
Varição Entrópica da Água Evaporada na secagem			-8.5	kJ/kgv.K
Exergia da Água removida na secagem			200.9	J/s
Irreversibilidade no processo de Secagem			227.4	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional			7.3	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas			13.2	%

TABELA 5.2.3.2.2.2. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, com veloc. do ar de 3,00 m/s e pot. elétrica requerida pelo sist. de refrigeração de 1000 W.

DADOS DE ENTRADA				VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local				93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco da Entrada				25.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido da Entrada				20.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar resfriado e desumidificado				17.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ar resfriado e desumidificado				15.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar após a secagem do produto				16.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do ar após a secagem do produto				15.0	C
Temperatura da Água de Condensação				14.0	C
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de resfriamento				1000.0	J/s
Velocidade do ar				3.0	m/s
Vazão da Água de Condensação				1.9E-07	m ³ /s
Varição de Pressão entre os pontos 1 e 2				0.75	kPa
Varição de Pressão entre os pontos 2 e 3				0.25	kPa
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:					
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	RESFRIADO	SAÍDA		
Temperatura de Bulbo Seco	25.0	17.0	16.0		C
Temperatura de Bulbo Úmido	20.0	15.0	15.0		C
Temperatura de Ponto de Orvalho	17.8	13.9	14.4		C
Umidade Absoluta do ar	0.014	0.011	0.011		kgv/kg
Umidade Relativa do ar	64.3	81.8	90.5		%
Volume Específico do Ar Úmido	0.94	0.91	0.91		m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	60.5	44.3	44.3		kJ/kg
RESULTADOS DO CALCULO DO BALANCO ENERGETICO ENTRE 1 E 2 e ENTRE 2 E 3:					
Vazão do Ar				0.05	m ³ /s
Fluxo Mássico do ar				0.06	kg/s
Varição de Umidade de 1 a 2				0.003	kgv/kg
Varição de entálpica de 1 a 2				16.2	kJ/kg
Entalpia da Água de condensação				58.8	kJ/kgv
Varição Energética entre 1 e 2				905.6	J/s
Varição de Umidade de 2 a 3				0.0004	kgv/kg
Vapor de água removido durante a secagem				.000024	kgv/s
Entalpia da Água adicionada ao ar na secagem				2465.9	kJ/kgv
Varição Energética entre 2 e 3				59.4	J/s
Eficiência de 1ª Lei				90.6	%
RESULTADOS DO CALCULO DO BALANCO EXERGETICO ENTRE 1 E 2 e ENTRE 2 E 3:					
Exergia no ponto 1				0.0	J/s
Exergia no ponto 2				48.9	J/s
Exergia da fonte de Resfriamento				1000.0	J/s
Entalpia da Água (Estado de Vapor)				2533.0	kJ/kgv
Entalpia da Água (Estado Líquido)				67.1	kJ/kgv
Entropia da Água (Estado Líquido)				0.2	kJ/kgv.K
Entropia da Água (Estado de Vapor)				8.7	kJ/kgv.K
Densidade Da Água de Condensação				1000.7	kgv/m ³
Fluxo de Água de Condensação				.00019	kgv/s
Exergia da Água de Condensação				18.8	J/s
Irreversibilidade no processo				932.2	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional				6.8	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas				6.8	%
Exergia no ponto 3				23.8	J/s
Varição Entrópica da Água Evaporada na secagem				-8.5	kJ/kgv.K
Exergia da Água removida na secagem				199.1	J/s
Irreversibilidade no processo de Secagem				224.3	J/s
Eficiência de 2ª Lei - Tradicional				9.6	%
Eficiência de 2ª Lei - T. J. Kotas				12.6	%

TABELA 5.2.3.2.2.3. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

AMOSTRA	PARÂMETRO	U _{B.U.1} (%)	U _{B.U.2} (%)	U _{B.U.3} (%)	MÉDIA
06		16,76	16,73	16,66	16,72
07		16,89	16,80	16,84	16,84
08		17,37	17,33	17,41	17,37

TABELA 5.2.3.2.2.4. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1 °C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

AMOSTRA	PARÂMETRO	U _{B.U.1} (%)	U _{B.U.2} (%)	U _{B.U.3} (%)	MÉDIA
06		16,76	16,73	16,66	16,72
07		16,89	16,80	16,84	16,84
08		17,37	17,33	17,41	17,37

TABELA 5.2.3.2.2.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

AMOSTRA	PARÂMETRO	U _{B.U.1} (%)	U _{B.U.2} (%)	U _{B.U.3} (%)	MÉDIA
06		13,03	12,98	12,97	12,99
07		13,08	13,02	13,07	13,06
08		13,01	12,81	12,98	12,93

TABELA 5.2.3.2.2.6. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO - 1 (%)	GERMINAÇÃO - 2 (%)	GERMINAÇÃO - 3 (%)	GERMINAÇÃO - 4 (%)	MÉDIA
06	76,00	84,00	84,00	92,00	84,00
07	100,00	96,00	92,00	92,00	95,00
08	92,00	90,00	94,00	90,00	91,50

TABELA 5.2.3.2.2.7. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1° C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO - 1 (%)	GERMINAÇÃO - 2 (%)	GERMINAÇÃO - 3 (%)	GERMINAÇÃO - 4 (%)	MÉDIA
06	76,00	84,00	60,00	76,00	74,00
07	92,00	88,00	90,00	98,00	92,00
08	88,00	96,00	96,00	84,00	91,00

TABELA 5.2.3.2.2.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
06	70,00	58,00	74,00	66,00	67,00
07	96,00	80,00	80,00	92,00	87,00
08	84,00	96,00	96,00	88,00	91,00

TABELA 5.2.3.2.2.9. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
06	76,00	88,00	72,00	52,00	72,00
07	80,00	76,00	76,00	92,00	81,00
08	84,00	84,00	76,00	80,00	81,00

TABELA 5.2.3.2.2.10. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; após preservação em câmara a -1° C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
06	48,00	44,00	36,00	48,00	44,00
07	64,00	72,00	80,00	72,00	72,00
08	72,00	68,00	80,00	92,00	78,00

TABELA 5.2.3.2.2.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 6, 7 e 8; utilizada após o processo de conservação, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
06	8,00	28,00	20,00	24,00	20,00
07	8,00	12,00	28,00	12,00	15,00
08	56,00	32,00	12,00	32,00	33,00

5.2.3.2.3. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar por resistências, a baixas vazões, realizado em 6/6/96.

TABELA 5.2.3.2.3.1. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de aquecimento de 2396 W.

DADOS DE ENTRADA		VALORES	UNIDADE	
Pressão Atmosférica Local		93.3	kPa	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada		20.0	C	
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada		18.0	C	
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido		33.0	C	
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 3		0.5	kPa	
Velocidade do Ar		1.5	m/s	
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída		32.0	C	
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.		2396.0	J/s	
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	20.0	33.0	32.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	18.0	22.1	22.1	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	17.0	17.0	18.1	C
Umidade Absoluta do ar	0.013	0.013	0.014	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	83.1	38.7	43.6	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	0.96	0.96	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	53.7	67.1	68.4	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIACAO ENERGÉTICA				
Área do Duto		0.018	m ²	
Vazão do Ar		0.027	m ³ /s	
Varição de Umidade do Ar		0.0009	kgv/kg	
Fluxo Mássico do Ar		0.028	kg/s	
Vapor removido na secagem		.00002	kgv/s	
Varição Entálpica entre 1 e 2		13.3	kJ/kg	
Energia resultante (1-3)		433.0	J/s	
Eficiência de 1ª Lei		18.1	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA - PROCESSO DE AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1		0.0	J/s	
Exergia do Ponto 2		21.0	J/s	
Exergia do Ponto 3		7.3	J/s	
Exergia da fonte de aquecimento		2396.0	J/s	
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)		2374.9	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)		0.9	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)		0.9	%	
RESULTADOS DA AVALIACAO EXERGETICA - PROCESSO DE SECAGEM				
Entalpia da água removida		2561.1	kJ/kgv	
Varição Entrópica da Água Evaporada na Secagem		-8.4	kJ/kgv.K	
Exergia da Água removida na secagem		528.3	J/s	
Irreversibilidade na secagem (2-3)		542.0	J/s	
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)		1.3	%	
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)		2.6	%	

TABELA 5.2.3.2.2. Resultados do processo de conservação de sementes de soja, utilizando o aquecimento do ar por resistências elétricas, com velocidade do ar de 1,50 m/s e potência consumida pelo sistema de aquecimento de 2396 W.

DADOS DE ENTRADA			VALORES	UNIDADE
Pressão Atmosférica Local			93.3	kPa
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Entrada			19.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Entrada			18.0	C
Temperatura de Bulbo Seco do ar aquecido			56.0	C
Varição de Pressão entre os Pontos 1 e 3			0.5	kPa
Velocidade do Ar			1.5	m/s
Temperatura de Bulbo Seco do Ar de Saída			29.0	C
Pot. Elet. Req. pelo Sist. de Aquec.			2396.0	J/s
RESULTADOS DAS PROPRIEDADES PSICROMETRICAS:				
NOME DA VARIÁVEL DO AR	ENTRADA	AQUECIDO	SAÍDA	
Temperatura de Bulbo Seco	19.0	56.0	29.0	C
Temperatura de Bulbo Úmido	18.0	28.3	28.3	C
Temperatura de Ponto de Orvalho	17.5	17.5	28.1	C
Umidade Absoluta do ar	0.014	0.014	0.026	kgv/kg
Umidade Relativa do ar	91.2	12.2	94.8	%
Volume Específico do Ar Úmido	0.92	1.03	0.97	m ³ /kg
Entalpia do Ar Úmido	53.7	91.9	96.5	kJ/kg
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA				
Área do Duto			0.018	m ²
Vazão do Ar			0.027	m ³ /s
Varição de Umidade do Ar			0.013	kgv/kg
Fluxo Mássico do Ar			0.026	kg/s
Vapor removido na secagem			.00033	kgv/s
Varição Entálpica entre 1 e 2			38.2	kJ/kg
Energia resultante (1-3)			1826.0	J/s
Eficiência de 1ª Lei			76.2	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA - PROCESSO DE AQUECIMENTO				
Exergia do Ponto 1			0.0	J/s
Exergia do Ponto 2			72.5	J/s
Exergia do Ponto 3			20.4	J/s
Exergia da fonte de aquecimento			2396.0	J/s
Irreversibilidade no aquecimento (1-2)			2323.5	J/s
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (1-2)			3.0	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (1-2)			3.0	%
RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXERGÉTICA - PROCESSO DE SECAGEM				
Entalpia da água removida			2601.4	kJ/kgv
Varição Entrópica da Água Evaporada na Secagem			-7.9	kJ/kgv.K
Exergia da Água removida na secagem			6236.4	J/s
Irreversibilidade na secagem (2-3)			6288.5	J/s
Eficiência de 2ª lei - Tradicional (2-3)			0.3	%
Eficiência de 2ª lei - T. J. Kotas (2-3)			0.8	%

TABELA 5.2.3.2.3.3. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9; após umidificação para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B,U.1}$ (%)	$U_{B,U.2}$ (%)	$U_{B,U.3}$ (%)	MÉDIA
02		15,41	15,43	15,39	15,41
05		16,10	16,27	16,09	16,15
09		18,48	18,45	18,49	18,47

TABELA 5.2.3.2.3.4. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B,U.1}$ (%)	$U_{B,U.2}$ (%)	$U_{B,U.3}$ (%)	MÉDIA
02		15,41	15,43	15,39	15,41
05		16,10	16,27	16,09	16,15
09		18,48	18,45	18,49	18,47

TABELA 5.2.3.2.3.5. Resultados da umidade em base úmida (%) das amostras 2, 5 e 9 utilizada após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

AMOSTRA	PARÂMETRO	$U_{B,U.1}$ (%)	$U_{B,U.2}$ (%)	$U_{B,U.3}$ (%)	MÉDIA
02		13,78	13,49	13,57	13,61
05		13,21	13,17	13,14	13,18
09		14,30	14,29	14,26	14,28

TABELA 5.2.3.2.3.6 Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
02	92,00	96,00	96,00	100,00	96,00
05	92,00	92,00	100,00	92,00	94,00
09	72,00	92,00	80,00	80,00	81,00

TABELA 5.2.3.2.3.7 Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1° C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
02	100,00	94,00	84,00	90,00	92,00
05	90,00	82,00	90,00	96,00	89,50
09	72,00	92,00	80,00	80,00	81,00

TABELA 5.2.3.2.3.8. Resultados do teste de germinação (%) das amostras 2, 5 e 9; utilizadas após o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	GERMINAÇÃO -1 (%)	GERMINAÇÃO -2 (%)	GERMINAÇÃO -3 (%)	GERMINAÇÃO -4 (%)	MÉDIA
02	88,00	80,00	86,00	96,00	89,00
05	68,00	100,00	96,00	92,00	89,00
09	80,00	78,00	80,00	70,00	77,00

TABELA 5.2.3.2.3.9. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; para atingir patamar próximo ao da colheita e ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
02	84,00	92,00	76,00	88,00	85,00
05	80,00	76,00	80,00	88,00	81,00
09	64,00	68,00	72,00	68,00	68,00

TABELA 5.2.3.2.3.10. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; após preservação em câmara a -1°C para ser utilizada durante o processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
02	80,00	84,00	76,00	80,00	80,00
05	84,00	72,00	52,00	76,00	71,00
09	48,00	48,00	48,00	56,00	50,00

TABELA 5.2.3.2.3.11. Resultados do teste de vigor (%) das amostras 2, 5 e 9; utilizadas após processo de conservação, através do aquecimento do ar por resistências elétricas e com baixas vazões.

PRODUTO	SEMENTES DE SOJA				
PARÂMETRO AMOSTRA	VIGOR -1 (%)	VIGOR -2 (%)	VIGOR -3 (%)	VIGOR -4 (%)	MÉDIA
02	12,00	24,00	8,00	8,00	13,00
05	24,00	48,00	12,00	16,00	25,00
09	24,00	32,00	12,00	32,00	25,00

5.3. DISCUSSÃO

5.3.1. Introdução

Seguindo a sequência apresentada no item anterior, passou-se a discutir e analisar os resultados obtidos através do agrupamento dos dados e aplicação de análise estatística, segundo teoria descrita por HINES & MONTGOMERY (1980); SNEDECOR & COCHRAN (1980); NETER, WASSERMAN & KUTNER (1983) e GOMES (1987) e; com a utilização de programas estatísticos computacionais, tais como, SAS (1979); SANEST de ZONTA & MACHADO (1993) e, por último, NONLIN de SHERROD (1990).

5.3.2. Processos Psicrométricos

5.3.2.1. Aquecimento do ar por resistências elétricas:

Neste processo a máxima eficiência energética obtida foi de 44,54 %, enquanto a eficiência exergética máxima foi da ordem de 2,50 %; ambas para uma velocidade do ar de 3,0 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências de 2332 J/s, que eram os maiores valores de velocidade do ar e de potência elétrica.

Quanto ao menor valor de eficiência energética este foi igual a 7,11 % e quanto a eficiência exergética mínima, esta apresentou um resultado de 0,42 %; onde ambos os valores eram provenientes de uma velocidade do ar de 0,10 m/s e potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências de 616 W. Coincidentemente ou não, tais valores foram obtidos utilizando-se o menor valor de velocidade do ar e, também, o menor valor de potência elétrica das resistências.

Outro aspecto interessante notado foi que em todas as análises realizadas, neste processo, as eficiências energéticas foram sempre superiores às eficiências exergéticas, resultando num coeficiente de relação médio (γ) entre a eficiência de 1^a Lei versus a eficiência de 2^a Lei, da ordem de 15.

5.3.2.2. Aquecimento e umidificação do ar por água quente:

Dentre os resultados obtidos para o processo de aquecimento e umidificação do ar via água quente a maior eficiência energética foi de 41,41 %, enquanto que a avaliação exergética, através da eficiência exergética, atingiu o valor máximo de 1,69 %, ambos os resultados obtidos com uma velocidade do ar de 0,50 m/s e com uma potência elétrica requerida pelas resistências elétricas de aquecimento da água de 509 W, desconsiderando-se neste caso, a potência elétrica requerida pelo conjunto moto-bomba-aspersores.

Caso leve-se em consideração a potência elétrica requerida pelo referido conjunto o maior valor atingido pelas eficiências energéticas e exergéticas seriam 23,75 % e 1,23 %, respectivamente, ambos, agora, para uma velocidade do ar de 1,50 m/s e para uma potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências elétricas de aquecimento da água de 799 W e de 1000 W para o conjunto moto-bomba-aspersores.

Fazendo-se a análise, com relação ao patamar inferior e levando-se em consideração as potências elétricas requeridas tanto pelo conjunto de resistências de aquecimento da água quanto pelo conjunto de moto-bomba-aspersores, que apresentaram valores de 376 W e 1025 W, respectivamente; a eficiência energética mínima obtida era igual a 9,54 %, enquanto que a análise exergética produzia uma eficiência mínima de 0,34 %.

Outrossim notou-se que, também, para este processo a eficiência energética nunca foi inferior à eficiência exergética, produzindo, ainda, um coeficiente de relação médio entre ambas de 30,0.

5.3.2.3. Umidificação e aquecimento do ar

Este processo por ser considerado a combinação de dois processos psicrométricos distintos, procurou-se, por isso, determinar as eficiências energéticas e exergéticas de cada processo individualmente, para depois, analisar o efeito de sua combinação.

Para a primeira situação, isto é, o processo de umidificação do ar via injeção de água pelos aspersores, a máxima eficiência energética obtida foi igual a 4,31 %, enquanto que a eficiência exergética máxima não ultrapassou a casa dos 2,91 %; ambas avaliadas para uma velocidade do ar de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pelo motor da bomba hidráulica de 1050 W.

Avaliou-se, também, para esta primeira situação, as eficiências mínimas obtidas tanto pela avaliação energética quanto pela exergética e obteve-se os seguintes resultados: 0,61 % e 0,40 %, respectivamente; sendo ambos os valores obtidos com uma velocidade do ar de 0,25 m/s e uma potência elétrica requerida pelo motor da bomba hidráulica de 1050 W.

Observa-se, ainda, que os valores de eficiências máximas, energética e exergética, foram calculadas com o fluxo de ar máximo; enquanto que as eficiências mínimas, energética e exergética, foram obtidas com o fluxo de massa de ar na velocidade mínima.

Quanto a segunda situação, isto é, o processo de aquecimento do ar, previamente umidificado, por resistências elétricas; a máxima eficiência energética alcançou um valor de 79,41 % contra um valor de 8,24 % para a eficiência exergética; numa situação onde a velocidade do ar, comum a ambas, era de 1,50 m/s e a potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências aletadas de aquecimento do ar de 2232 W; que eram, respectivamente, as maiores velocidade e potência utilizadas durante este experimento.

Nesta mesma situação, em contrapartida, a menor eficiência energética atingida foi igual a 15,62 % e a mínima eficiência de 2^a Lei foi equivalente a 1,16 %, ambas alcançadas com uma velocidade do ar de 0,25 m/s e uma potência elétrica requerida pelo conjunto de resistências aletadas de aquecimento do ar de 608 W. Observou-se que, reciprocamente, tais valores, eram o de menor velocidade e potência elétrica, deste teste.

Já, para uma análise global, isto é, utilizando-se da combinação do dois processos psicrométricos (umidificação + aquecimento), a máxima eficiência energética alcançada igualou-se a 55,38 %, enquanto que para a análise exergética, o maior valor de eficiência, na combinação dos processos, atingiu um patamar de 6,61 %, para um fluxo de ar com velocidade de 1,50 m/s e uma potência elétrica requerida pelo conjunto de

resistências elétricas de 2232 W e potência elétrica requerida pelo conjunto moto-bomba-aspersores de 1050 W; novamente, resultante da utilização de valores máximos de velocidade do ar e de potências elétricas.

Outrossim, verificou-se que para os patamares inferiores, as eficiências energéticas e exergéticas mínimas obtidas foram de 6,12 % e 0,68 %, respectivamente; obtidas, igualmente, através da utilização da menor velocidade do ar e das menores potências elétricas requeridas pelos sistemas de umidificação e aquecimento.

Os coeficientes de relação médio entre as eficiências energéticas e exergéticas foram: 1,48 e 1,53, para o processo de umidificação e eficiências máximas e mínimas, respectivamente; 9,62 e 13,47 para o processo de aquecimento e eficiências máximas e mínimas, respectivamente e; finalmente, 8,38 e 9,00 para o processo global (umidificação + aquecimento) com eficiências máximas e mínimas, nesta ordem.

5.3.2.4. Resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado:

Neste experimento, o ponto de máxima eficiência energética foi alcançado a 77,40 % e o de eficiência de 2^a Lei a 4,65 %; para uma velocidade de ar de 1,50m/s e potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração de 1050 W, maiores valores utilizados durante os testes realizados.

Já, para o mesmo processo, a menor eficiência energética experimentada foi da ordem de 14,75 %, enquanto a eficiência exergética mínima não ultrapassava a casa dos 1,27 %, ambas calculadas com a menor velocidade registrada que era de 0,25 m/s, embora com as potências elétricas requeridas pelo sistema de refrigeração diferentes, a eficiência energética com o mesmo valor do cálculo das eficiências máximas, isto é, 1050 W, enquanto que a eficiência exergética utilizava em seus resultados o valor de 1025 W.

Da mesma forma que nos experimentos anteriores as eficiências energéticas sempre ultrapassaram as eficiências exergéticas, sendo que o coeficiente de relação médio entre as eficiências energéticas e exergéticas foi igual a 15,30.

5.3.2.5. Resfriamento do ar por água gelada:

Para este processo, a maior eficiência energética alcançada atingiu o patamar de 73,29 %, enquanto que para a eficiência exergética o maior valor obtido não ultrapassou a grandreza de 2,68 %; quando a velocidade do ar estava no máximo, isto é, 1,50 m/s e as potências elétricas requeridas pelos sistemas de refrigeração e de umidificação eram, respectivamente, 1000 e 1050 W.

Quanto aos valores inferiores, estes foram de 4,33 % para a eficiência de 1^a Lei e 0,20 % para a eficiência de 2^a Lei, num processo onde a velocidade do ar era mínima, quer dizer, 0,25 m/s e as potências elétricas requeridas pelos sistemas de refrigeração e umidificação eram iguais ao do cálculo das eficiências máximas.

Novamente, todos os resultados das eficiências energéticas foram superiores ao das eficiências exergéticas e apresentou um coeficiente de relação médio de 23,83.

5.3.2.6. Resfriamento evaporativo do ar

Nota-se que, embora em todos os resultados obtidos a eficiência psicrométrica atingisse, sempre, seu valor máximo (= 100 %); este processo foi o que apresentou, até o presente momento, os mais baixos índices de eficiência, quer pela avaliação utilizando os conceitos da 1^a Lei da Termodinâmica, quer pela análise combinada dos conceitos da 1^a e 2^a Leis da Termodinâmica.

Os resultados, então, foram de 0,53 % para a máxima eficiência energética, enquanto que a máxima eficiência exergética atingiu, apenas, 2,10 %; ambos para uma velocidade máxima de 1,50 m/s e potência elétrica requerida pela bomba hidráulica de 1025 W.

Os valores mínimos de eficiências energética e exergética foram de 0,10 % para a avaliação energética e 0,36 % para a avaliação exergética; quando a velocidade do ar era, mínima, de 0,25 m/s e com a mesma potência elétrica requerida pelo conjunto moto-bomba-aspersores, que do cálculo feito para as eficiências máximas.

Outro aspecto inusitado, neste processo, e diferente dos demais, até aqui apresentados, foi que os valores obtidos no cálculo das eficiências energéticas, quer para o patamar superior ou para o inferior, eram inferiores ao das eficiências exergéticas. Por conseguinte, pela primeira vez, o coeficiente de relação médio entre as eficiências energéticas e as exergéticas foi menor que a unidade, sendo da ordem de 0,24.

5.3.2.7. Mistura adiabática de duas correntes de ar-

5.3.2.7.1. Caso A:

Neste primeiro processo de mistura adiabática de duas correntes de ar, onde a corrente de ar 2 (ar externo) era aquecido e umidificado pela corrente de ar 1, a maior eficiência de energia obtida foi equivalente a 55,54 %, enquanto que para a eficiência de exergia este valor reduziu-se a 17,17 %.

Quanto aos valores mínimos, estes foram de 43,89 % para a eficiência de 1^a Lei contra o valor de 5,34 % obtido para a eficiência exergética.

Observou-se ainda, que as eficiências energéticas estiveram sempre maiores que as eficiências exergéticas e que o coeficiente de relação médio entre ambas atingiu uma relação da ordem de 5,06.

5.3.2.7.2. Caso B:

Neste segundo processo de mistura adiabática de dois fluxos de ar, onde o fluxo de ar 2 (ar externo) era resfriado e desumidificado pelo fluxo de ar 1; a máxima eficiência energética calculada apresentou um resultado de 98,99 % contra apenas 49,12 % para a maior eficiência exergética.

Na situação de análise das eficiências mínimas, os resultados indicaram o valor de 94,94 % para a análise energética, enquanto que a análise exergética apresentou um resultado de 41,16 %.

Como, no caso anterior, as eficiências energéticas sempre suplantaram as eficiências exergéticas e o fator de correlação calculado foi de 2,20.

5.3.2.8. Síntese dos resultados obtidos para os processos psicrométricos

TABELA 5.3.2.8.1. Valores das eficiências energéticas e exergeticas mínimas e máximas e coeficiente de relação médio para os diferentes processos psicrométricos.

EFICIÊNCIAS	ENERGÉTICAS	EXERGETICAS	V (m/s) e PE (Js)	ENERGÉTICAS	EXERGETICAS	V (m/s) e PE (J/s)	$\gamma = \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\eta}_T}$
PROCESSOS PSICROMÉTRICOS	MÍN.(%)	MIN.(%)		MAX. (%)	MÁX. (%)		
AQUECIMENTO POR RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	7,11	0,42	0,10 e 616	44,54	2,50	3,00 e 2332	15,00
AQUECIMENTO POR ÁGUA QUENTE	9,54	0,34	0,25 e 1401	23,75	1,23	1,50 e 1799	30,00
UMIDIFICAÇÃO E AQUECIMENTO	6,12	0,68	0,25 e 1658	55,38	6,61	1,50 e 3282	8,69
RESFRIAMENTO POR EXPANSÃO DIRETA	14,75	1,57	0,25 e 1050	77,40	4,65	1,50 e 1050	15,30
RESFRIAMENTO POR ÁGUA GELADA	4,33	0,20	0,25 e 2050	73,29	2,68	1,50 e 2050	23,83
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DO AR	0,10	0,36	0,25 e 1025	0,53	2,10	1,50 e 1025	0,24
MISTURA ADIABÁTICA - CASO A	43,89	5,34		55,54	17,17		5,06
MISTURA ADIABÁTICA - CASO B	94,94	41,16		98,99	49,12		2,20

5.3.3. Estudo de Casos

5.3.3.1. Produto perecível

5.3.3.1.1. Conservação do tomate cereja, via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado:

Neste primeiro processo de conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado; a maior eficiência resultante da análise de 1^a Lei correspondeu ao valor máximo de 98,19 %, entretanto o valor obtido pelos cálculos da avaliação exergética não excedeu a 4,83 %.

Quanto ao patamar inferior, as eficiências mínimas encontradas foram de 17,51 % e 1,58 % para as eficiências energéticas e exergéticas, respectivamente.

Novamente, todos os valores de eficiência energética excederam aos de exergética por um coeficiente de relação médio entre elas de 17,85.

Além disso, utilizou-se como parâmetros para a análise estatística os resultados obtidos com as variáveis: ^o Brix, pH, Acidez Titulável - AT - (%) e Umidade em base úmida - U_{B.U.} (%). Comparou-se, através de uma análise de variância, se as diferenças observadas entre as médias das variáveis, acima citadas, neste processo de conservação podem ser atribuídas a casualidade ou se, realmente, indicam uma diferença real, estatisticamente significativa, causada pela ação do processo de conservação; tratamentos distintos (ambiente externo, geladeira a 6^o C e SIGEP).

Testou-se, portanto, a hipótese nula, que quer dizer, que as médias das populações do tomate cereja com estádios de maturação verde e, depois para o maduro (colorido), para aquelas variáveis, eram todas iguais.

TABELA 5.3.3.1.1.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ^o Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	^o BRUX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ^o C	SIGEP
MÉDIA	4,70	4,75	4,81
DESVIO PADRÃO	0,24	0,32	0,18
SOMA	61,10	61,80	62,50

TABELA 5.3.3.1.1.2. Tabela de Análise de Variância para a variável ^o Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,08	0,04	0,58
RESÍDUO	36	2,34	0,07	
TOTAL	38	2,42		

Como o valor de F_{TABULADO} com dois graus de liberdade no numerador (tratamentos) e trinta e seis graus de liberdade no denominador (resíduos), ao nível de

significância de 1 %, isto é $F_{TAB.;0,01;2;36} = 5,25$ e, portanto, maior que o $F_{CALC.} = 0,58$; não se pode rejeitar a hipótese de que não há diferença entre as médias dos tratamentos; quer dizer, não existe evidência, ao nível de 1 % de significância, que para este processo de conservação deste produto perecível, com relação a variável $^{\circ}$ Brix, que as médias nos três tratamentos distintos (ambiente externo, geladeira a 6° C e SIGEP) foram significativamente diferentes.

TABELA 5.3.3.1.1.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6° C	SIGEP
MÉDIA	4,08	3,93	3,96
DESVIO PADRÃO	0,10	0,05	0,07
SOMA	53,10	51,14	51,52

TABELA 5.3.3.1.1.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,17	0,08	14,77
RESÍDUO	36	0,20	0,01	
TOTAL	38	0,37		

Como, $F_{TAB.} = 5,25$ é menor que o $F_{CALC.} = 14,77$, rejeita-se a hipótese da nulidade, isto é, de que não há diferença entre as médias dos tratamentos (ambiente externo, geladeira a 6° C e SIGEP) para a variável pH, ao nível de 1% de significância e, pode-se afirmar que há evidências significativas para se concluir que os respectivos tratamentos causaram diferenças nesta variável.

TABELA 5.3.3.1.1.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Acidez Titulável -AT (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6° C	SIGEP
MÉDIA	0,52	0,70	0,62
DESVIO PADRÃO	0,08	0,07	0,11
SOMA	6,82	9,05	8,06

TABELA 5.3.3.1.1.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,19	0,10	12,28
RESÍDUO	36	0,28	0,01	
TOTAL	38	0,47		

Devido ao fato de $F_{TAB.} = 5,25 < F_{CALC.} = 12,28$, novamente, rejeita-se a hipótese nula, isto é, de que não há diferença entre as médias dos tratamentos (ambiente externo, geladeira a 6 °C e o processo no SIGEP) para a variável Acidez Titulável -AT (%), no nível de significância de 1% e, pode-se dizer que há evidências para se concluir que as médias da referida variável, entre os tratamentos foram significativamente diferentes, devido aos mesmos.

TABELA 5.3.3.1.1.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - U_{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	UMIDADE EM BASE ÚMIDA (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	92,25	93,18	93,09
DESVIO PADRÃO	1,13	0,55	0,46
SOMA	276,72	279,54	279,26

TABELA 5.3.3.1.1.8. Tabela de Análise de Variância para a variável U_{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	1,61	0,80	1,34
RESÍDUO	6	3,60	0,60	
TOTAL	8	5,21		

Sendo $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 1,34$, aceita-se a hipótese (nula) de que não existe diferença entre as médias dos tratamentos para a variável Umidade do produto - tomate cereja - em base úmida (%), ao nível de significância de 1% e, portanto, conclui-se que o fato de conservar o produto em ambiente externo, na geladeira a 6 °C e no SIGEP com resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado não causaram diferenças significativas na umidade do referido fruto.

Procedeu-se da mesma maneira e na mesma sequência para o tomate cereja com grau de maturação:maduro (colorido)

TABELA 5.3.3.1.1.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável °BRIX, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

PARÂMETRO			
TRATAMENTOS	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	5,08	5,28	5,24
DESVIO PADRÃO	0,17	0,39	0,32
SOMA	66,10	68,70	68,10

TABELA 5.3.3.1.1.10. Tabela de Análise de Variância para a variável ° Brix, do tomate cereja, com grau de maturação: maduro (colorido).

CAUSA DE VARIÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,29	0,14	1,53
RESÍDUO	36	3,36	0,09	
TOTAL	38	3,65		

Da mesma maneira que para o fruto verde, aceita-se a hipótese de que não ocorreu diferenças entre as médias dos tratamentos, para a variável °Brix, com nível significativo de 1%, pois $F_{TAB.} = 5,25 > F_{CALC.} = 1,53$ e; portanto, o fato do produto ter sido conservado em diferentes ambientes (ambiente externo, geladeira a 6 °C e no SIGEP, através do resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado) não causou à variável acima nenhuma diferença significativa.

TABELA 5.3.3.1.1.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

PARÂMETRO	pH		
TRATAMENTOS	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	4,21	4,01	4,04
DESVIO PADRÃO	0,12	0,06	0,06
SOMA	54,76	52,10	52,51

TABELA 5.3.3.1.1.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,32	0,16	20,69
RESÍDUO	36	0,27	0,01	
TOTAL	38			

Como $F_{TAB.} = 5,25 < F_{CALC.} = 20,69$, rejeita-se a hipótese de que não existe diferença entre as médias da variável -pH-, nos tratamentos utilizados, ao nível de significância de 1 % e, conclui-se que os tratamentos de conservação do produto afetam a referida variável, neste experimento e com o referido nível significativo, estatisticamente.

TABELA 5.3.3.1.1.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

PARÂMETRO			
TRATAMENTOS	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	0,47	0,66	0,61
DESVIO PADRÃO	0,09	0,06	0,06
SOMA	6,17	8,55	7,87

TABELA 5.3.3.1.1.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,23	0,12	21,10
RESÍDUO	36	0,20	0,01	
TOTAL	38	0,43		

Como $F_{TAB.} = 5,25 < F_{CALC.} = 21,10$, não aceita-se a hipótese de que não há diferença entre as médias dos tratamentos para a variável Acidez Titulável - AT - (%), no nível de significância de 1 % e, pode-se concluir que existe evidências significativas de que os respectivos tratamentos interferem no resultado da variável AT, para este produto com o grau de significância estatístico, acima definido.

TABELA 5.3.3.1.1.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

PARÂMETRO	Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	92,96	92,94	93,41
DESVIO PADRÃO	0,27	0,27	0,37
SOMA	278,87	278,81	280,24

TABELA 5.3.3.1.1.16. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,44	0,22	2,30
RESÍDUO	6	0,57	0,09	
TOTAL	8	1,01		

Como $F_{TAB.} = 10,92 > F_{CALC.} = 2,30$, aceita-se a hipótese da nulidade entre as médias dos tratamentos para a variável Umidade em base úmida (%), ao nível de significância de 1% e, por conseguinte, finaliza-se, dizendo que os tratamentos utilizados na conservação do produto perecível:tomate cereja, não afetaram a variável $U_{B.U.}$ (%).

5.3.3.1.2. Conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento do ar por água gelada

Neste segundo tratamento de conservação do produto perecível: tomate cereja, através do resfriamento do ar via água gelada; a máxima eficiência energética atingiu um patamar de 24,58 %, enquanto que a maior eficiência exergética obtida foi da ordem de 1,30 %.

Com respeito ao patamar inferior, obteve-se para a eficiência energética mínima de 4,45 % contra uma eficiência de 2ª Lei de 0,91 %.

Da mesma forma que para a maioria dos processos anteriores as eficiências exergéticas nunca excederam as eficiências energéticas e, apresentaram, para efeito de comparação, um coeficiente de relação médio de 9,77.

TABELA 5.3.3.1.2.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ⁰ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	⁰ BRIX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ⁰ C	SIGEP
MÉDIA	4,90	4,77	4,76
DESVIO PADRÃO	0,23	0,13	0,45
SOMA	34,30	33,40	33,30

TABELA 5.3.3.1.2.2. Tabela de Análise de Variância para a variável ⁰ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,09	0,04	0,47
RESÍDUO	18	1,65	0,09	
TOTAL	20	1,74		

Como $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,47$, aceita-se a hipótese da nulidade, de que as médias entre os tratamentos (ambiente externo, geladeira a 6 ⁰ C e SIGEP com o processo de conservação utilizando o resfriamento do ar por água gelada) para a variável ⁰BRIX, ao nível de 1 % de significância, eram iguais e, portanto os tratamentos não causaram modificação significativa na variável em questão.

TABELA 5.3.3.1.2.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ⁰ C	SIGEP
MÉDIA	3,98	3,82	3,96
DESVIO PADRÃO	0,16	0,07	0,12
SOMA	27,88	26,73	27,70

TABELA 5.3.3.1.2.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,11	0,05	3,87
RESÍDUO	18	0,25	0,01	
TOTAL	20	0,36		

Devido ao fato de $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 3,87$; aceita-se a hipótese de que não existe diferença significativa entre as médias da variável pH, para os respectivos tratamentos, ao nível de significância de 1 %; isto é, os tratamentos de conservação do tomate cereja em ambiente externo, na geladeira a 6 °C e no SIGEP com o processo de resfriamento do ar por água gelada, não causaram mudanças significativas na variável em questão, para o fruto com estágio de maturação: verde.

TABELA 5.3.3.1.2.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	0,64	0,74	0,62
DESVIO PADRÃO	0,07	0,07	0,08
SOMA	4,48	5,17	4,32

TABELA 5.3.3.1.2.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,06	0,03	5,19
RESÍDUO	18	0,10	0,01	
TOTAL	20	0,16		

Como $F_{TAB.} = 6,01 > F_{CALC.} = 5,19$; aceita-se a hipótese de que as médias da variável Acidez Titulável - AT - ,expressa em porcentagem, nos tratamentos (ambiente externo, geladeira a 6 °C e SIGEP com resfriamento do ar via água gelada) não sofreram efeitos significativos do ambiente de conservação, ao nível de 1 % de significância.

TABELA 5.3.3.1.2.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	$U_{B.U.}$ (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	92,71	93,16	93,29
DESVIO PADRÃO	0,83	0,48	0,33
SOMA	278,13	279,49	279,88

TABELA 5.3.3.1.2.8. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,56	0,28	0,82
RESÍDUO	6	2,05	0,34	
TOTAL	8	2,61		

Uma vez que $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 0,82$ aceita-se o fato de que as médias da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$, expressa em %, não sofreram alterações, ao nível de 1 % de significância, quando conservou-se o produto perecível: tomate cereja; em locais, distitamente, climatizados.

Procedeu-se a mesma análise estatística para o produto perecível: tomate cereja, porém com estágio de maturação: colorido (maduro) e, obteve-se os seguintes resultados.

TABELA 5.3.3.1.2.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	$^{\circ}$ BRIX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 $^{\circ}$ C	SIGEP
MÉDIA	5,33	5,31	5,39
DESVIO PADRÃO	0,21	0,25	0,38
SOMA	37,30	37,20	37,70

TABELA 5.3.3.1.2.10. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ BRIX (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,02	0,01	0,12
RESÍDUO	18	1,49	0,08	
TOTAL	20	1,51		

Como $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,12$, aceita-se a hipótese de que as médias da variável $^{\circ}$ BRIX eram iguais, para um nível altamente significativo; quando o produto, tomate cereja com grau de maturação colorido, foram conservados em ambientes climatizados distintos; a um nível significativo de 1%.

TABELA 5.3.3.1.2.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	4,06	3,92	4,06
DESVIO PADRÃO	0,12	0,06	0,13
SOMA	28,39	27,47	28,42

TABELA 5.3.3.1.2.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,08	0,04	3,58
RESÍDUO	18	0,21	0,01	
TOTAL	20	0,29		

Sendo $F_{TAB} > F_{CALC.}$, não se pode rejeitar a hipótese nula, de que as médias da variável pH eram iguais, ao nível de significância de 1 % e, portanto, os tratamentos em questão, não interferem, significativamente, no pH dos frutos em estado de maturação colorido, ao serem conservados em diferentes ambientes.

TABELA 5.3.3.1.2.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	0,61	0,74	0,59
DESVIO PADRÃO	0,10	0,05	0,10
SOMA	4,24	5,16	4,14

TABELA 5.3.3.1.2.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,09	0,05	6,01
RESÍDUO	18	0,14	0,01	
TOTAL	20	0,23		

Como $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 = F_{CALC.} = 6,01$, já poderia rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias, porém testou-se, também, para um nível de significância de 5 % e, chegou-se ao seguinte resultado; $F_{TAB.;0,05;2;18} = 3,55 < F_{CALC.}$ que, portanto, confirma a rejeição de que as médias da variável AT fossem iguais, ao nível de 5 % de significância; o que indicou que os tratamentos alteravam o comportamento da Acidez Titulável - AT - (%) do tomate cereja com grau de maturação colorido, neste experimento.

TABELA 5.3.3.1.2.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	Umidade em base úmida (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	92,53	92,52	92,61
DESVIO PADRÃO	0,35	0,09	0,29
SOMA	277,58	277,56	277,82

TABELA 5.3.3.1.2.16. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação colorido (maduro).

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,02	0,01	0,10
RESÍDUO	6	0,43	0,07	
TOTAL	8	0,45		

Com $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 0,10$, aceita-se o fato de que as médias da variável $U_{B.U.}$ eram iguais, ao nível de significância de 1 % e, portanto, os tratamentos de conservação do produto não provocaram mudanças significativas na Umidade em base úmida (%), para o tomate cereja com estágio de maturação colorido (maduro), neste teste.

5.3.3.1.3. Conservação do produto perecível: tomate cereja, via resfriamento evaporativo do ar.

Para o processo de conservação do produto perecível: tomate cereja, utilizando-se do processo de resfriamento evaporativo do ar obteve-se uma eficiência energética máxima de 0,91 % e uma eficiência exergética máxima de 4,16 %; embora a eficiência psicrométrica fosse, sempre, de 100 %.

Quanto ao lado inferior, este processo de conservação apresentou uma eficiência energética mínima de 0,60 % contra uma eficiência na avaliação exergética de 2,03 %.

Dentre os estudos de casos, para a conservação do produto perecível: tomate cereja, até agora apresentados, foi o processo que produziu os menores valores de eficiências, quer energéticas quer sejam exergéticas, no que diz respeito aos valores de máxima quanto aos de mínima.

Similar à análise feita para o processo de resfriamento evaporativo, sem produto, as eficiências energética máxima e mínima foram sempre inferiores às eficiências exergéticas máxima e mínima, respectivamente.

O coeficiente médio de relação entre as eficiências energética e exergética foi igual a 0,27

TABELA 5.3.3.1.3.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	$^{\circ}$ BRIX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 $^{\circ}$ C	SIGEP
MÉDIA	4,83	4,69	4,76
DESVIO PADRÃO	0,14	0,29	0,17
SOMA	33,80	32,80	33,30

TABELA 5.3.3.1.3.2. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,07	0,035	0,80
RESÍDUO	18	0,80	0,044	
TOTAL	20	0,87		

Como $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,80$, aceita-se a hipótese de que as médias da variável $^{\circ}$ Brix eram iguais, embora conservadas em locais diferentes (tratamentos), ao nível de 1 % de significância e, portanto, a conservação do produto perecível: tomate cereja com grau de maturação verde no ambiente externo, na geladeira a 6 $^{\circ}$ C e no SIGEP com o resfriamento evaporativo do ar, não causaram comportamento diferente significativo no $^{\circ}$ BRIX, deste fruto, neste experimento.

TABELA 5.3.3.1.3.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 $^{\circ}$ C	SIGEP
MÉDIA	3,81	3,74	3,85
DESVIO PADRÃO	0,14	0,07	0,08
SOMA	26,69	26,18	26,93

TABELA 5.3.3.1.3.4. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,04	0,02	2,05
RESÍDUO	18	0,18	0,01	
TOTAL	20	0,22		

Sendo $F_{TAB.} = 6,01 > F_{CALC.} = 2,05$, aceita-se a hipótese nula, de que as médias da variável pH foram iguais para os três tratamentos distintos a saber, ambiente externo, geladeira a 6 °C e no SIGEP com o processo de conservação utilizando o resfriamento evaporativo do ar; ao nível de 1 % de significância; o que significa dizer que a conservação do produto perecível: tomate cereja, em ambientes diferentes, não causou alterações na variável pH, neste experimento.

TABELA 5.3.3.1.3.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	0,73	0,69	0,69
DESVIO PADRÃO	0,04	0,07	0,08
SOMA	5,13	4,82	4,80

TABELA 5.3.3.1.3.6. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,01	4,89 *E-03	1,04
RESÍDUO	18	0,08	4,69 *E-03	
TOTAL	20	0,09		

Como $F_{TAB.,0,01;2;18} = 6,01$. $F_{calc.} = 1,04$ aceita-se a hipótese de igualdade entre as médias da variável AT (%), para os tratamentos, ao nível de 1% de significância; isto é, a referida variável não foi alterada pelos tratamentos aplicados neste ensaio.

TABELA 5.3.3.1.3.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	92,41	92,38	92,86
DESVIO PADRÃO	0,60	0,56	0,40
SOMA	277,23	277,15	278,58

TABELA 5.3.3.1.3.8. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

CAUSA DE VARIÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	$F_{CALC.}$
TRATAMENTOS	2	0,43	0,22	0,79
RESÍDUO	6	1,64	0,27	
TOTAL	8	2,07		

Devido ao fato de $F_{TAB.:0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 0,79$, aceita-se a hipótese nula, de que as médias da variável $U_{B.U.}$ nos tratamentos: ambiente externo, geladeira a 6 °C e SIGEP operando com o processo de resfriamento evaporativo do ar; eram iguais, ao nível significativo de 1 % e, portanto, pode-se afirmar que os referidos tratamentos não alteraram o comportamento da umidade em base úmida de forma significativa, neste experimento.

Repetiu-se as mesmas análises para o produto perecível: tomate cereja, porém, desta vez, com grau de maturação médio (intermediário) e obteve-se os seguintes resultados:

TABELA 5.3.3.1.3.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ° Brix, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

PARÂMETRO	°BRIX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	4,84	4,94	5,23
DESVIO PADRÃO	0,43	0,13	0,43
SOMA	33,90	34,60	36,60

TABELA 5.3.3.1.3.10. Tabela de Análise de Variância para a variável $^{\circ}$ Brix, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,56	0,28	2,15
RESÍDUO	18	2,35	0,13	
TOTAL	20	2,91		

Sendo $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 2,15$, aceita-se a hipótese de que as médias da variável $^{\circ}$ Brix eram iguais, independente do tipo de ambiente utilizado para a conservação do produto perecível: tomate cereja com estágio de maturação médio (intermediário), ao nível de significância de 1 %; isto quer dizer que a conservação do referido produto em ambiente externo, em geladeira a 6° C e no SIGEP com o processo de resfriamento evaporativo do ar não afetou de forma significativa a variável, acim citada, durante a realização deste experimento.

TABELA 5.3.3.1.3.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6° C	SIGEP
MÉDIA	3,73	3,72	3,78
DESVIO PADRÃO	0,10	0,06	0,09
SOMA	26,12	26,03	26,45

TABELA 5.3.3.1.3.12. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,01	0,005	0,98
RESÍDUO	18	0,13	0,007	
TOTAL	20	0,14		

Como $F_{TAB.} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,98$, não se rejeita a hipótese nula de que as médias da variável pH, nos diferentes tratamentos, eram iguais, ao nível de 1 % de significância e, por conseguinte, pode-se dizer que não há evidências de que a conservação do produto em ambientes distintos possa ter causado mudanças no pH do fruto, no estágio de maturação médio (intermediário).

TABELA 5.3.3.1.3.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ^o C	SIGEP
MÉDIA	0,77	0,81	0,81
DESVIO PADRÃO	0,10	0,10	0,08
SOMA	5,38	5,68	5,66

TABELA 5.3.3.1.3.14. Tabela de Análise de Variância para a variável AT (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,008	4,02*E-03	0,53
RESÍDUO	18	0,13	0,007	
TOTAL	20	0,138		

Obtendo-se $F_{TAB.} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,53$, concorda-se com o fato de que as médias da variável Acidez Titulável - AT - (%) eram iguais, ao nível de significância de 1 %, para os diferentes tratamentos de conservação do produto perecível: tomate cereja com maturação: médio (intermediário) e, isto leva a conclusão de que a conservação do referido fruto não afetou a acidez, durante o período de experimentação.

Finalmente, aplicou-se a mesma análise estatística para a variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$, expressa em porcentagem, no produto perecível: tomate cereja com grau de maturação médio (intermediário).

TABELA 5.3.3.1.3.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

PARÂMETRO	Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ^o C	SIGEP
MÉDIA	92,65	92,51	92,64
DESVIO PADRÃO	0,23	0,37	0,36
SOMA	277,96	277,54	277,93

TABELA 5.3.3.1.3.16. Tabela de Análise de Variância para a variável $U_{B.U.}$ (%), do tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,04	0,02	0,17
RESÍDUO	6	0,64	0,11	
TOTAL	8	0,68		

Como $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC} = 0,17$, aceita-se a hipótese da nulidade, de que as médias da variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$, expressa em %, eram iguais, ao nível de significância de 1 %; quando os tratamentos foram: ambiente externo, geladeira na temperatura de 6 °C e SIGEP com o processo de resfriamento evaporativo do ar. Em vista disso, pode-se afirmar que a variável $U_{B.U.}$ não foi afetada de forma contundente pelo tipo de conservação aplicado ao produto perecível: tomate cereja, com grau de maturação médio (intermediário).

Com o produto perecível: tomate cereja, mas com estágio de maturação maduro (colorido) aplicou-se, de forma similar, igual análise estatística, obtendo-se os resultados descritos abaixo:

TABELA 5.3.3.1.3.17. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável ° Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	° BRUX		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	5,54	5,14	5,23
DESVIO PADRÃO	0,45	0,25	0,25
SOMA	38,80	36,00	36,60

TABELA 5.3.3.1.3.18. Tabela de Análise de Variância para a variável ° BRUX, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,62	0,31	2,81
RESÍDUO	18	1,99	0,11	
TOTAL	20	2,61		

Como $F_{TAB.;0,01;2;18} = 6,01 > F_{CALC.} = 2,81$, aceita-se a hipótese nula, de que as médias da variável ° Brix eram iguais, ao nível de significância de 1 %, para os diferentes tratamentos de conservação do produto perecível: tomate cereja com estágio de maturação tipo maduro (colorido). Com isso observa-se que não existem evidências, significativas, para afirmar que a conservação em diferentes ambientes, a saber, ambiente

externo, geladeira na temperatura de 6 °C e SIGEP com resfriamento evaporativo do ar; tenha causado alterações na variável em questão durante a realização do experimento.

TABELA 5.3.3.1.3.19. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	pH		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	3,88	3,73	3,82
DESVIO PADRÃO	0,11	0,04	0,06
SOMA	27,15	26,08	26,17

TABELA 5.3.3.1.3.20. Tabela de Análise de Variância para a variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

CAUSA DE VARIÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,08	0,04	6,67
RESÍDUO	18	0,11	0,006	
TOTAL	20	0,19		

Sendo $F_{TAB.} < F_{CALC.}$, rejeita-se a hipótese de que as médias da variável pH eram iguais, para os tratamentos de conservação do tomate cereja com grau de maturação do tipo colorido (maduro), ao nível de 1 % de significância e, portanto, pode-se afirmar que os referidos tratamentos provocaram alterações significativas no pH do fruto, neste teste.

TABELA 5.3.3.1.3.21. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável -AT- (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 ° C	SIGEP
MÉDIA	0,71	0,78	0,76
DESVIO PADRÃO	0,12	0,10	0,07
SOMA	4,98	5,47	5,31

TABELA 5.3.3.1.3.22. Tabela de Análise de Variância para a variável AT, do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,02	0,01	0,95
RESÍDUO	18	0,17	0,009	
TOTAL	20	0,19		

Devido ao fato de $F_{TAB.} = 6,01 > F_{CALC.} = 0,95$, concorda-se com a hipótese de nulidade, isto é, de que as médias da variável Acidez Titulável - AT - (%) eram iguais, ao nível de significância de 1 %, para os seguintes tratamentos de conservação do tomate cereja com estágio de maturação colorido (maduro): ambiente externo, geladeira a 6 °C e SIGEP usando o processo de resfriamento evaporativo do ar. Com isso, pode-se afirmar que não existem diferenças evidentes entre as médias da referida variável para os distintos tratamentos, quando utilizados neste experimento.

TABELA 5.3.3.1.3.23. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida U_{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

PARÂMETRO	Umidade em base úmida - U _{B.U.} - (%)		
	AMBIENTE EXTERNO	GELADEIRA A 6 °C	SIGEP
MÉDIA	91,91	92,08	92,03
DESVIO PADRÃO	0,45	0,35	0,45
SOMA	275,74	276,23	276,08

TABELA 5.3.3.1.3.24. Tabela de Análise de Variância para a variável U_{B.U.} (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro (colorido).

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,04	0,02	0,12
RESÍDUO	6	1,05	0,175	
TOTAL	8	1,09		

Com $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 0,12$, aceita-se o fato de que há fortes evidências das médias da variável Umidade em base úmida U_{B.U.}, expressas em porcentagem, serem iguais, quando aplicados como tratamentos do produto perecível: tomate cereja com maturação do tipo maduro (colorido), a preservação em ambiente externo, na geladeira com temperatura de 6 °C e no SIGEP operando com o resfriamento evaporativo do ar e, portanto, conclui-se que os referidos tratamentos não interferiram, de forma significativa, na umidade do produto durante esta fase experimental.

5.3.3.1.4. Análise estatística entre os processos de conservação realizados pelo SIGEP

Com a finalidade de dar subsídios a avaliação energética e exergetica dos processos psicrométricos aplicados à conservação do produto perecível: tomate cereja analisou-se, em seguida, o comportamento dos processos de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar aplicados na preservação da qualidade do referido produto, através da aplicação da análise de variância nas médias das variáveis: °BRIX, pH, Acidez Titulável = AT (%) e Umidade do fruto em base úmida = $U_{B.U.}$ (%) para o fruto com dois estádios de maturação diferentes, a saber, verde e maduro; quando o SIGEP operava com os processos, acima descritos, aqui, agora, considerados tratamentos distintos.

Os resultados obtidos estão compilados, em forma de tabelas, na sequência:

TABELA 5.3.3.1.4.1. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável °BRIX, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO LOCAL	°BRIX		
	SIGEP		
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	4,81	4,76	4,19
DESVIO PADRÃO	0,18	0,45	1,50
SOMA	51,46	33,30	29,30

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.2. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável °BRIX, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

CAUSA DE VARIAÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	1,91	0,955	1,50
RESÍDUO	24	15,19	0,633	
TOTAL	26	17,10		

Como $F_{TAB.;0,01;2;24} = 5,61$ ou $F_{TAB.;0,05;2;24} = 3,40 > F_{CALC.} = 1,50$, aceita-se a hipótese nula, que diz que as médias do parâmetro °Brix eram iguais, tanto ao nível de 1 % quanto ao nível de 5 % de significância e, portanto, conclui-se que os três diferentes tipos de resfriamentos aplicados ao fruto: tomate cereja, não causaram mudanças significativas na variável em questão, durante a realização dos experimentos, com o fruto no grau de maturação verde.

TABELA 5.3.3.1.4.3. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	pH		
	SIGEP		
LOCAL			
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	3,96	3,96	3,85
DESVIO PADRÃO	0,07	0,12	0,08
SOMA	51,46	27,70	26,93

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

Como a escolha de um nível de significância determina a frequência relativa de dois tipos de erros, que se pode cometer ao selecionar a porcentagem de tal nível, isto é, erro do tipo I que é o fato de se rejeitar a hipótese nula, quando ela está correta e; o erro do tipo II que é o fato de se falhar em detectar a verdade da hipótese alternativa, quando esta está correta.

Em experimentos envolvendo produtos agrícolas é comum usar um nível de significância de 5 %, devido ao fato de, geralmente, não se ter uma garantia da homogeneidade das amostras, por se tratar de produtos vegetais “vivos” e, portanto, passíveis de uma heterogeneidade natural dos seres vivos. Todavia, até a presente avaliação, vinha-se trabalhando com um nível de significância de 1%, em quase todos os testes, pois os resultados para um nível de significância maior, também, chegaria nos mesmos resultados. No entanto, a partir de agora, toda vez que o nível de 5 % de significância rejeitar a H₀ (Hipótese Nula), este será adotado, para um maior grau de confiabilidade e redução na probabilidade de se cometer um Erro do Tipo I.

TABELA 5.3.3.1.4.4. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável pH, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

CAUSA DE VARIACÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,06	0,03	4,00
RESÍDUO	24	0,18	0,0075	
TOTAL	26	0,24		

Observa-se que na tabela anterior o valor do F_{CALC.} = 4,00 é maior que o valor do F_{TAB.,0,05;2;24} = 3,40 e, com isso rejeita-se a hipótese nula (H₀) de que as médias da variável pH eram iguais, quando expostas aos tratamentos distintos no SIGEP e, portanto, aceita-se a hipótese alternativa (H_a) de que os respectivos tratamentos afetavam de alguma forma, ao nível de significância de 5 % a referida variável, durante a realização dos experimentos em questão.

TABELA 5.3.3.1.4.5. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
LOCAL	SIGEP		
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	0,62	0,62	0,69
DESVIO PADRÃO	0,11	0,08	0,08
SOMA	8,06	4,32	4,80

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.6. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável Acidez Titulável - AT - (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIÂÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,02	0,01	1,20
RESÍDUO	24	0,23	0,0096	
TOTAL	26	0,25		

Como tanto ao nível de 5 % quanto ao nível de 1 % de significância, o valor de $F_{TAB.}$ (3,40 e 5,61, respectivamente) foi maior que o valor de $F_{CALC.}$ (1,20); aceita-se H_0 , de que as médias da variável AT (%) não sofreram interferência significativa dos tratamentos utilizados pelo SIGEP na conservação do produto perecível: tomate cereja, com estágio de maturação verde, durante os testes realizados.

TABELA 5.3.3.1.4.7. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - U_{B.U.} - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida - U _{B.U.} - (%)		
LOCAL	SIGEP		
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	93,09	93,29	92,86
DESVIO PADRÃO	0,46	0,33	0,40
SOMA	279,26	279,88	278,58

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.8. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação verde para a variável Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIACÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,28	0,14	0,88
RESÍDUO	6	0,97	0,16	
TOTAL	8	1,25		

Como $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92$ e $F_{TAB.;0,05;2;6} = 5,14$, sendo ambos maiores que $F_{CALC.} = 0,88$, aceita-se H_0 de que as médias da variável $U_{B.U.}$ não foram afetadas de forma significativa, tanto a 1 % quanto a 5 % de nível de significância, pelos tratamentos aplicados aos frutos de tomate cereja com estágio de maturação verde, nesta fase experimental.

Para o produto perecível: tomate cereja, porém com grau de maturação do tipo maduro (colorido), aplicou-se os mesmos testes estatísticos, para se verificar os efeitos da utilização dos três diferentes processos de resfriamento do ar na conservação do referido produto e respectivos parâmetros de quantificação da qualidade do fruto em questão, a saber: °BRIX, pH, AT e $U_{B.U.}$, respectivamente.

TABELA 5.3.3.1.4.9. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável °Brix, do tomate cereja, com grau de maturação maduro.

PARÂMETRO	°BRIX		
	SIGEP		
LOCAL			
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	5,24	5,39	5,23
DESVIO PADRÃO	0,32	0,38	0,25
SOMA	68,10	37,70	36,60

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.10. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável $^{\circ}$ BRIX, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

CAUSA DE VARIÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÇÃO			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,12	0,06	0,60
RESÍDUO	24	2,41	0,10	
TOTAL	26	2,53		

Como ambos $F_{TAB.}$ (para 1 e 5 % de significância) são maiores que $F_{CALC.}$, aceita-se a hipótese de que as médias da variável $^{\circ}$ Brix não foram afetadas pelos tratamentos aplicados e, portanto, pode-se afirmar com um alto grau de significância que os tratamentos impostos na conservação do tomate com estágio de maturação do tipo colorido (maduro) não interferiram no $^{\circ}$ Brix do fruto, durante a condução destes experimentos.

TABELA 5.3.3.1.4.11. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável pH, do tomate cereja, com grau de maturação maduro.

PARÂMETRO LOCAL	pH		
	SIGEP		
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	4,04	4,06	3,82
DESVIO PADRÃO	0,06	0,13	0,06
SOMA	52,51	28,42	26,71

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.12. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável pH, quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

CAUSA DE VARIÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÇÃO			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,28	0,14	19,76
RESÍDUO	24	0,17	0,0071	
TOTAL	26	0,45		

Sendo $F_{TAB.}$ (a 1 % e 5 % de significância) < $F_{CALC.}$, rejeita-se com alto grau de significância a H_0 , que diz que as médias da variável pH eram iguais, nos referidos índices de significância, quando os frutos foram submetidos aos diferentes tratamentos de conservação e, portanto, tais tratamentos interferiram de forma significativa no pH do referido produto.

TABELA 5.3.3.1.4.13. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Acidez Titulável - AT - (%), do tomate cereja, com grau de maturação maduro.

PARÂMETRO	Acidez Titulável - AT - (%)		
LOCAL	SIGEP		
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	0,60	0,59	0,76
DESVIO PADRÃO	0,06	0,10	0,07
SOMA	7,81	4,14	5,31

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.14. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável AT (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	0,13	0,065	11,87
RESÍDUO	24	0,13	0,005	
TOTAL	26	0,26		

Novamente, rejeita-se a H_0 , de que as médias, desta vez da variável AT (%), eram iguais, em ambos níveis de significância (1 e 5 %), quando o produto perecível: tomate cereja era submetido a diferentes tratamentos de conservação e, por conseguinte, uma vez mais, tais tratamentos provocaram mudanças significativas na Acidez Titulável do tomate cereja com maturação do tipo maduro (ou colorido).

TABELA 5.3.3.1.4.15. Valores da média, desvio padrão e soma, da variável Umidade em base úmida - $U_{B.U.}$ - (%), do tomate cereja, com grau de maturação verde.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%)		
	SIGEP		
LOCAL			
TRATAMENTOS	R.A.C.D.E.A.	R.A.H ₂ O.G	R.E.A.
MÉDIA	93,41	92,61	92,03
DESVIO PADRÃO	0,37	0,29	0,45
SOMA	280,24	277,82	276,08

R.A.C.D.E.A. = Resfriamento do Ar por Contato Direto com Evaporador Aletado.

R.A.H₂O.G. = Resfriamento do Ar por H₂O Gelada.

R.E.A. = Resfriamento Evaporativo do Ar.

TABELA 5.3.3.1.4.16. Resultados da análise de variância do tomate cereja com grau de maturação maduro (colorido) para a variável $U_{B.U.}$ (%), quando conservado nos tratamentos: R.A.C.D.E.A.; R.A.H₂O.G. e R.E.A.

CAUSA DE VARIÂÇÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
TRATAMENTOS	2	2,91	1,455	10,31
RESÍDUO	6	0,85	0,142	
TOTAL	8	3,76		

Embora, $F_{TAB.;0,01;2;6} = 10,92 > F_{CALC.} = 10,31$, rejeita-se a hipótese nula (H_0), ao nível de 5 % de significância, pois neste $F_{TAB.;0,05;2;6} = 5,14$ que é menor que o valor de F calculado e, portanto, existe diferenças significativas entre as médias da variável $U_{B.U.}$ ao terem sido submetidas aos tratamentos de **R.A.C.D.E.A.**; **R.A.H₂O.G.** e **R.E.A.** com a finalidade de conservação do tomate cereja com maturação do tipo maduro (colorido), nestas fases experimentais.

Com o auxílio dos resultados das análises estatísticas do teste F descritos nas tabelas anteriores, a partir da tabela 5.3.3.1.4.4., onde detectou-se diferenças significativas entre as médias da variável pH, quando os frutos de tomate cereja com grau de maturação verde sofreram alterações significativas ao serem submetidos aos tratamentos distintos de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, de resfriamento do ar por água gelada e de resfriamento evaporativo do ar. Aplicou-se, então, em todas as situações onde ocorreram diferenças, estatisticamente, significativas, o teste de TUKEY, ao nível de 5 % de probabilidade, a fim de se comparar quais tratamentos eram diferentes entre si, dois a dois.

Em ordem decrescente, tem-se que as médias da variável pH, para o tomate cereja do tipo verde, submetido aos tratamentos acima citados, são:

$$\hat{m}_1 = 3,96$$

$$\hat{m}_2 = 3,96$$

$$\hat{m}_3 = 3,85$$

O teste $F = 4,00$, mostrou que, embora, ao nível de 1 % de significância, não houvesse diferença entre as médias da variável pH, esta ocorreria aos 5 % de significância e, portanto, rejeitou-se a hipótese nula de que as médias da referida variável eram iguais; o que significa dizer que os tratamentos de conservação dos frutos verdes de tomate cereja provocaram modificações significativas à variável pH, durante as fases experimentais.

Em virtude disso as médias verdadeiras provavelmente são bem distintas, embora desconhecidas. Como se deseja obter informações mais detalhadas sobre as referidas médias, aplicou-se o teste de TUKEY, com a finalidade de compará-las duas a duas de todos os modos possíveis.

Para isso, calculou-se, primeiramente, a diferença mínima significativa (Δ), dada pela seguinte expressão:

$$\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}} \quad 250$$

onde:

q = amplitude total estudentizada, ao nível de 5 % de probabilidade, fornecido em tabelas específicas;

s = estimativa do desvio padrão = $\sqrt{Q.M.R}$ 251

r = número de repetições de cada um dos tratamentos.

Com $n = 3$ tratamentos e $n' = 24$ G.L. (graus de liberdade) para o resíduo, tem-se que $q = 3,53$, ao nível de 5 % de probabilidade; $s = \sqrt{0,0075} = 0,0866$ e $r = 7$, obteve-se um valor de $\Delta = 0,11$. Então, toda diferença entre duas médias, do ensaio realizado, que for superior ou igual a diferença mínima significativa (Δ), resulta em médias distintas. Portanto, não existe diferença significativa entre as médias dos dois primeiros tratamentos, porém observou-se diferenças significativas entre os dois primeiros tratamentos em relação ao último deles. Logo, no quadro abaixo, médias seguidas de mesma letra não apresentam diferenças significativas, enquanto que médias seguidas por letra diferente apresentam diferença significativa, ao nível de 5 % de probabilidade.

$$\hat{m}_1 = 3,96 \quad a$$

$$\hat{m}_2 = 3,96 \quad a$$

$$\hat{m}_3 = 3,85 \quad b$$

Repetiu-se a mesma análise para as médias de variáveis que apresentaram diferenças significativas, ao nível de 5 % de probabilidade, ao serem submetidas aos três tratamentos distintos que, segundo os resultados anteriores, foram pH, AT (%) e $U_{B.U.}$ (%),

só que para os frutos de tomate cereja com estágio de maturação: colorido (maduro). Então, obteve-se os seguintes resultados:

tomate cereja maduro

variável: pH

$$\hat{m}_2 = 4,06 \text{ a}$$

$$\hat{m}_1 = 4,04 \text{ a}$$

$$\hat{m}_3 = 3,82 \text{ b}$$

variável: AT (%)

$$\hat{m}_3 = 0,76 \text{ a}$$

$$\hat{m}_1 = 0,60 \text{ b}$$

$$\hat{m}_2 = 0,59 \text{ b}$$

variável: U_{B.U.} (%)

$$\hat{m}_1 = 93,41 \text{ a}$$

$$\hat{m}_2 = 92,61 \text{ a}$$

$$\hat{m}_3 = 92,03 \text{ b}$$

Pode-se observar que, em todas as análises realizadas pelo teste de TUKEY, o tratamento de conservação do produto perecível através do resfriamento evaporativo do ar provocou, sempre, alterações significativas nas variáveis acima descritas.

5.3.3.2. Produto Deteriorável

5.3.3.2.1. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de aquecimento do ar via resistências elétricas aletadas, com velocidade do ar de até 3,5 m/s.

Neste processo a máxima eficiência energética atingida foi de 77,02 %, enquanto que a eficiência exergética máxima alcançada foi de 2,84 %.

Para o patamar inferior, a menor eficiência energética, neste experimento, alcançou o valor de 50,28 %; enquanto que a mínima eficiência exergética obtida, era, durante esta fase experimental, de 2,25 % .

Observou-se, ainda, através dos resultados tabulados, que a eficiência energética foi sempre superior que a eficiência exergética, quer quando se tratava de eficiências mínimas ou quando se tratava de eficiências máximas e; que o coeficiente de relação médio entre as eficiências energéticas e exergéticas foi de 24,50.

Viu-se, na análise do produto perecível, que o delineamento estatístico inteiramente casualizado só se justificava pois os frutos de tomate cereja apresentavam-se como um material experimental homogêneo; o que não vem a ser o caso do produto deteriorável: sementes de soja, que, pelas análises de Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%), teste de Germinação (%) e teste de Poder de Vigor (%), demonstraram uma certa heterogeneidade, justificando, portanto, a preferência na utilização do delineamento por blocos casualizados, onde a homogeneidade passou a ser exigida apenas dentro de cada bloco.

Dos resultados obtidos e tabulados, anteriormente, extraiu-se as tabelas seguintes, com intuito de se aplicar a referida análise estatística, a saber:

TABELA 5.3.3.2.1.1. Resultados da média, desvio padrão e soma da variável $U_{B.U.}$ (%), quando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1°C e processo de secagem através de resistências elétricas com velocidade máxima de 3,5 m/s.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%)		
	UMIDIFICAÇÃO	GELADEIRA A -1°C	SIGEP
MÉDIA	17,31	17,31	12,03
DESVIO PADRÃO	0,92	0,92	0,52
SOMA	51,94	51,94	36,09

TABELA 5.3.3.2.1.2. Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 1,5; 2,5 e 3,5 m/s (BLOCOS).

TRATAMENTOS	BLOCOS			TOTAL DOS TRATAMENTOS
	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	
UMIDIFICAÇÃO	17,52	16,31	18,11	51,94
GELADEIRA A -1°C	17,52	16,31	18,11	51,94
SIGEP	11,70	11,76	12,63	36,09
TOTAL DOS BLOCOS	46,74	44,38	48,85	139,97

TABELA 5.3.3.2.1.3. Resultados da análise de variância para a variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao primeiro teste de conservação.

CAUSA DE VARIACÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
BLOCOS	2	3,3336	1,6668	11,57 *
TRATAMENTOS	2	55,8272	27,9136	193,71 **
RESÍDUO	4	0,5764	0,1441	
TOTAL	8	59,7372		

A média geral do experimento foi de:

$$\hat{m} = \frac{G}{N} = \frac{139,97}{9} = 15,55$$

252

e o desvio padrão de:

$$s = \sqrt{Q.M.R.} = \sqrt{0,1441} = 0,38$$

logo, o coeficiente de variação (C.V), expresso em porcentagem, resultou em:

$$C.V = \frac{s*100}{\hat{m}} = \frac{0,38*100}{15,55} = 2,44\%$$

253

Com 2 e 4 graus de liberdade e uso de tabelas estatísticas, obteve-se os seguintes limites para **F**:

- Ao nível de 5 % de probabilidade: $F_{0,05;2;4} = 6,94$

- Ao nível de 1 % de probabilidade: $F_{0,01;2;4} = 18,00$

Conclui-se, pois, que o teste **F** deu resultado altamente significativo (**) ao nível de 1 % de probabilidade, para os tratamentos. Em outras palavras, se fossem iguais as médias de tratamentos, um valor de **F** tal como o obtido só ocorreria em menos de 1 % dos ensaios. À vista disso, rejeita-se a hipótese de nulidade, isto é, a hipótese de igualdade das médias dos tratamentos e, aceita-se como comprovado que há diferenças

reais, não casuais, entre elas, provocadas pelo tipo de tratamento a que foram submetidas as sementes de soja, no que diz respeito a variável $U_{B.U.}$ (%).

Conclui-se, também, que o teste **F** deu resultado significativo ($*$) ao nível de 5 % de probabilidade, para os blocos. O que significa que se as médias entre os blocos fossem iguais, um valor de **F** tal como calculado só ocorreria em menos de 5 % dos experimentos. Portanto, rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias dos blocos e, aceita-se com evidências comprovadas de que houve diferenças reais, não casuais, provocadas pelas divisões em blocos, na variável $U_{B.U.}$ (%).

Sendo as médias estimadas entre os tratamentos, em ordem decrescente, dadas por:

$$\hat{m}_1 = 17,31 \quad \hat{m}_2 = 17,31 \quad \hat{m}_3 = 12,03$$

Procedeu-se a comparação dessas médias através do cálculo do valor da diferença mínima significativa (Δ) do teste de TUKEY, conforme a equação 250:

$$\Delta = 5,04 * \frac{0,38}{\sqrt{3}} = 1,11$$

Conclui-se, pois, que toda diferença, entre as médias estimadas, igual ou superior a $\Delta = 1,11$ deve ser considerada significativa ao nível de 5 % de probabilidade, resultando na seguinte classificação:

$$\hat{m}_1 = 17,31 \quad a$$

$$\hat{m}_2 = 17,31 \quad a$$

$$\hat{m}_3 = 12,03 \quad b$$

Para o caso dos blocos, as médias estimadas, em ordem decrescente, foram:

$$\hat{m}_3 = 16,28$$

$$\hat{m}_1 = 15,58$$

$$\hat{m}_2 = 14,79$$

Com o mesmo valor da diferença mínima significativa ($\Delta=1,11$), pode-se concluir que toda diferença, entre as médias estimadas dos blocos, igual ou superior a $\Delta = 1,11$, deve ser considerada significativa ao nível de 5 % de probabilidade, produzindo a seguinte classificação:

$$\hat{m}_3 = 16,28 \quad a$$

$$\hat{m}_1 = 15,58 \quad a \quad b$$

$$\hat{m}_2 = 14,79 \quad b$$

5.3.3.2.2. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do processo de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

Neste processo a maior eficiência energética detectada foi igual a 90,56 %, quando ocorria o processo de resfriamento e desumidificação do ar anterior a passagem pelos grãos; enquanto que a máxima eficiência exergética era de 6,78 %.

Para a situação de mínima eficiência, a avaliação energética resultou num valor de 64,66 %, enquanto que a análise exergética produzia uma eficiência de 5,28 %.

Aqui, também, as eficiências energéticas foram, sempre, superiores às eficiências exergéticas e resultou num coeficiente de relação médio entre elas de 12,38.

Procedeu-se, a seguir, a análise estatística dos tratamentos de conservação do produto deteriorável: sementes de soja, quando submetidos, primeiramente a umidificação para tornar a umidade próxima daquela de colheita; segundo, a conservação em geladeira a uma temperatura de -1°C , em sacos plásticos herméticamente lacrados até a última aplicação, que era a secagem via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado.

TABELA 5.3.3.2.2.1. Resultados da média, desvio padrão e soma da variável $U_{B.U.}$ (%), quando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1°C e processo de secagem através de resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado com velocidade média de 3,0 m/s.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%)		
TRATAMENTOS	UMIDIFICAÇÃO	GELADEIRA A -1°C	SIGEP
MÉDIA	16,98	16,98	13,69
DESVIO PADRÃO	0,35	0,35	0,56
SOMA	50,93	50,93	41,08

TABELA 5.3.3.2.2.2. Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 1,0; 2,0 e 3,0 m/s (BLOCOS).

TRATAMENTOS	BLOCOS			TOTAL DOS TRATAMENTOS
	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	
UMIDIFICAÇÃO	16,72	16,84	17,37	50,93
GELADEIRA A -1°C	16,72	16,84	17,37	50,93
SIGEP	12,99	13,06	12,93	38,98
TOTAL DOS BLOCOS	46,43	46,74	47,67	140,84

TABELA 5.3.3.2.2.3. Resultados da análise de variância para a variável $U_{B,U}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao segundo teste de conservação.

CAUSA DE VARIACÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
BLOCOS	2	0,2776	0,1388	2,65
TRATAMENTOS	2	31,7339	15,8670	302,81 **
RESÍDUO	4	0,2094	0,0524	
TOTAL	8	32,2209		

A média geral do ensaio foi igual a:

$$\hat{m} = \frac{G}{N} = \frac{140,84}{9} = 15,65$$

enquanto que o desvio padrão alcançou um valor de:

$$s = \sqrt{Q.M.R.} = \sqrt{0,0524} = 0,23$$

produzindo, portanto, um coeficiente de variação (CV), expresso em %, de:

$$CV = \frac{s*100}{\hat{m}} = \frac{0,23*100}{15,65} = 1,47\%$$

Com 2 e 4 graus de liberdade, obteve-se de tabelas específicas, os seguintes limites para F:

- Ao nível de 5 % de probabilidade: $F_{0,05;2;4} = 6,94$
- Ao nível de 1 % de probabilidade: $F_{0,01;2;4} = 18,00$

Conclui-se, então, que o teste F deu resultado altamente significativo (**) ao nível de 1 % de probabilidade, para os tratamentos. À vista disso, rejeita-se a hipótese de nulidade, isto é, a hipótese de igualdade das médias dos tratamentos para a variável $U_{B,U}$ (%) e, aceita-se como comprovado a existência de diferenças reais, não casuais, entre as médias, causado pelos distintos tratamentos a que foram submetidas, neste experimento.

Aplicou-se, em seguida o teste de TUKEY, para averiguar as diferenças estatísticas entre as médias, seguindo metodologia descrita previamente; obtendo-se, a partir das médias estimadas em ordem decrescente, o seguinte resumo:

$$\hat{m}_1 = 16,98$$

$$\hat{m}_2 = 16,98$$

$$\hat{m}_3 = 12,99$$

Portanto, toda diferença entre as médias estimadas igual ou superior a

$\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}} = 5,04 * \frac{0,23}{\sqrt{3}} = 0,67$, foi considerada significativa ao nível de 5 % de probabilidade, o que resultou na seguinte ordenação das médias:

$$\hat{m}_1 = 16,98 \text{ a}$$

$$\hat{m}_2 = 16,98 \text{ a}$$

$$\hat{m}_3 = 12,99 \text{ b}$$

5.3.3.2.3. Conservação do produto deteriorável: sementes de soja, através do aquecimento do ar por resistências elétricas, utilizando-se baixas velocidades do ar (até 1,5 m/s).

Neste último ensaio, com o produto deteriorável, a eficiência energética máxima alcançada foi igual a 76,21 %, enquanto que a eficiência exergetica só atingia a marca superior de 3,03 %.

No caso dos resultados de eficiências inferiores, a eficiência energética mínima atingiu um valor de 18,07 % contra uma mínima eficiência exergetica de 0,88 %.

Similar aos testes anteriores, a eficiência energética sempre suplantou a exergetica e, para este caso, o coeficiente de relação médio entre os dois tipos de eficiências foi igual a 24,14.

TABELA 5.3.3.2.3.1. Resultados da média, desvio padrão e soma da variável $U_{B.U.}$ (%), quando submetida aos tratamentos de umidificação, conservação em geladeira a -1°C e processo de secagem através de aquecimento do ar por resistências elétricas com velocidades de até 1,50 m/s.

PARÂMETRO	Umidade em base úmida $U_{B.U.}$ (%)		
	UMIDIFICAÇÃO	GELADEIRA A -1°C	SIGEP
MÉDIA	16,68	16,68	13,69
DESVIO PADRÃO	1,60	1,60	0,56
SOMA	50,03	50,03	41,08

TABELA 5.3.3.2.3.2. Resultados das médias do delineamento em blocos casualizados da variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas aos tratamentos com umidificação, depois conservados em geladeira a -1°C e, finalmente, secados no SIGEP, com velocidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s (BLOCOS).

TRATAMENTOS	BLOCOS			TOTAL DOS TRATAMENTOS
	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	
UMIDIFICAÇÃO	15,41	16,15	18,47	50,03
GELADEIRA A -1°C	15,41	16,15	18,47	50,03
SIGEP	13,61	13,18	14,28	41,07
TOTAL DOS BLOCOS	44,63	45,48	51,22	141,33

TABELA 5.3.3.2.3.3. Resultados da análise de variância para a variável $U_{B.U.}$ (%) das sementes de soja, quando submetidas ao terceiro teste de conservação.

CAUSA DE VARIACÃO	TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F _{CALC.}
BLOCOS	2	8,5665	4,2833	7,64
TRATAMENTOS	2	11,5635	5,7818	10,31
RESÍDUO	4	2,2438	0,5610	
TOTAL	8	22,3738		

A média geral deste ensaio para a $U_{B.U.}$ foi igual a:

$$\hat{m} = \frac{G}{N} = \frac{141,33}{9} = 15,70$$

enquanto que o desvio padrão causado era de:

$$s = \sqrt{Q.M.R.} = \sqrt{0,561} = 0,75$$

produzindo, por conseguinte, um coeficiente de variação - CV - (%) da seguinte grandeza:

$$CV = \frac{s}{\hat{m}} * 100 = \frac{0,75}{15,70} * 100 = 4,77 \quad \%$$

Além disso, com 2 e 4 graus de liberdade, tabelas específicas para o teste **F** fornecem os seguintes limites:

- Ao nível de 5 % de probabilidade: $F_{0,05;2;4} = 6,94$
- Ao nível de 1 % de probabilidade: $F_{0,01;2;4} = 18,00$

Conclui-se que o teste **F** deu resultado significativo, ao nível de 5 % de probabilidade, tanto para os tratamentos quanto para os blocos. Portanto, rejeita-se, para ambos, a hipótese de igualdade entre as médias dos tratamentos e dos blocos para a variável $U_{B.U.}$ (%) e, aceita-se como significativo os efeitos causados, a referida variável, pelos tratamentos impostos e pela separação em blocos, pois, neste caso, existe diferenças reais, não casuais, entre elas.

À vista disso, aplicou-se para as médias dos tratamentos e dos blocos o teste de TUKEY, com a finalidade de se averiguar quais foram as médias diferentes entre si. Portanto, para os tratamentos ordenou-se, em ordem decrescente, as médias estimadas e, obteve-se o seguinte resultados:

$$\hat{m}_1 = 16,68$$

$$\hat{m}_2 = 16,68$$

$$\hat{m}_3 = 13,69$$

Como a diferença mínima significativa (Δ), neste caso, foi igual a:

$$\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}} = 5,04 * \frac{0,75}{\sqrt{3}} = 2,18$$

O que permite dizer que toda diferença, entre as médias estimadas, igual ou superior a $\Delta = 2,18$ foi considerada significativa, ao nível de 5 % de probabilidade, produzindo o seguinte resultado:

$$\hat{m}_1 = 16,68 \text{ a}$$

$$\hat{m}_2 = 16,68 \text{ a}$$

$$\hat{m}_3 = 13,69 \text{ b}$$

Já para os blocos, as médias estimadas obtidas, em ordem decrescente, foram:

$$\hat{m}_3 = 17,07$$

$$\hat{m}_2 = 15,16$$

$$\hat{m}_1 = 14,88$$

Uma vez que a diferença mínima significativa (Δ) é a mesma que a calculada para os tratamentos, isto é, $\Delta = 2,18$, obteve-se, então, a seguinte ordenação e diferenças para as médias estimadas da variável $U_{B.U.}$ (%) dentre os blocos:

$$\hat{m}_3 = 17,07 \text{ a}$$

$$\hat{m}_2 = 15,16 \text{ a} \quad \text{b}$$

$$\hat{m}_1 = 14,88 \quad \text{b}$$

5.3.3.3. Síntese dos resultados obtidos para os estudos de casos.

TABELA 5.3.3.3.1. Valores das eficiências energéticas e exergéticas mínimas e máximas e coeficiente de relação médio para os estudos de casos com produtos perecíveis e deterioráveis.

T I P O	EFICIÊNCIAS	ENERGÉTICAS		EXERGÉTICAS		$\gamma = \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\eta}_T}$
		MÍNIMA (%)	MÁXIMA (%)	MÍNIMA (%)	MÁXIMA (%)	
	PROCESSOS PSICROMÉTRICOS					
P E R	RESFRIAMENTO POR EXPANSÃO DIRETA	17,51	98,19	1,58	4,83	17,85
E C Í	RESFRIAMENTO POR ÁGUA GELADA	4,45	24,58	0,92	1,30	9,77
V E L	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO	0,60	0,91	2,03	4,16	0,27
D E T E	AQUECIMENTO POR RESISTÊNCIAS (A ALTAS VAZÕES)	50,28	77,02	0,33	2,68	24,50
R I O R	RESFRIAMENTO POR EXPANSÃO DIRETA	64,66	90,56	5,28	6,78	12,38
Á V E L	AQUECIMENTO POR RESISTÊNCIAS (A BAIXAS VAZÕES)	18,07	76,21	0,88	3,03	24,14

CONCLUSÕES

Ao se findar o capítulo anterior diversos aspectos puderam, então, ser observados e serviram como base principal para as conclusões descritas a seguir.

A principal conclusão, que se pode retirar deste experimento é que a metodologia de avaliação de sistemas e processos, utilizando-se dos conceitos baseados na 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, foi adequada para analisar processos psicrométricos gerados pelo equipamento, denominado SIGEP.

Em quase a totalidade dos processos e estudos de casos, exceção para o processo e estudo de caso de conservação do produto perecível: tomate cereja por resfriamento evaporativo do ar, a eficiência energética foi sempre superior à eficiência exergética. À vista disso, pode-se concluir que a avaliação energética, embora correta, foi menos eficaz em identificar a real capacidade de um sistema em realizar trabalho; proporcionando, às vezes, uma impressão de que processos e sistemas operavam com altas eficiências, não requerendo, portanto, melhorias técnicas; todavia ao se olhar este mesmo processo ou sistema, através das lentes da avaliação exergética, descobria-se quão distante estava-se de uma eficiência satisfatória.

Outro aspecto interessante foi que tanto a eficiência exergética calculada pelo método tradicional quanto aquela proposta por KOTAS coincidiram, numericamente, em quase todos os processos analisados; creditando-se este fato, principalmente, a situação do estado de entrada ser equivalente ao estado de referência. Portanto, em situações similares, a determinação da eficiência exergética pode ser realizada apenas pelo método tradicional.

De todos os processos analisados, quer na fase dos processos psicrométricos propriamente ditos quer na fase de utilização de alguns destes processos para a conservação do produto perecível: tomate cereja ou para a preservação do produto deteriorável: sementes de soja; a maior eficiência energética obtida foi de 98,99 % para o ensaio de mistura adiabática de duas correntes de ar (caso B), seguida do estudo de caso de conservação do produto perecível: tomate cereja via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado com 98,19 %. Da mesma maneira, a máxima eficiência exergética produzida pelo SIGEP, foi encontrada, também, no processo psicrométrico de mistura adiabática de duas correntes de ar (caso B), obtendo-se, então, para este caso o valor de 41,16 %.

Já, quando se procura os processos psicrométricos menos eficientes, tanto do ponto de vista energético quanto do exergético, encontra-se o valor de 0,10 % para a eficiência energética do processo de resfriamento evaporativo do ar e 0,20 % para a eficiência exergética do processo de resfriamento do ar por água gelada.

Pode-se, concluir, ainda, quantos aos processos psicrométricos gerados pelo SIGEP que, na sua grande maioria, apresentaram valores elevados de irreversibilidade, quando procedeu-se a avaliação exergetica. Tais valores, embora não quantificados ou qualificados por equipamentos ou componentes, devem, todavia, serem atribuídos ao fato de que os respectivos equipamentos ou componentes foram, previamente, dimensionados, não com o intuito de serem eficientes do ponto de vista termodinâmico, mas sim para atender os objetivos, inicialmente propostos, de gerar condições psicrométricas do ar precisas; o que levou a um projeto de super dimensionamento dos principais equipamentos de aquecimento e resfriamento do ar.

Observa-se, ainda, que no processo de resfriamento evaporativo do ar, embora a eficiência psicrométrica fosse máxima (=100 %), isto é, saturação adiabática completa do ar de entrada; foi o processo que teve as eficiências energéticas mais baixas. Portanto, conclui-se que a eficiência psicrométrica é uma ferramenta que analisa, apenas, o grau de saturação de um ar, após o resfriamento evaporativo e, logo, não deve ser usada, nunca, como um parâmetro de eficiência deste processo, o que, até o presente, tem sido feito por muitos pesquisadores da área de conforto térmico para animais e plantas.

Quanto ao estudo de casos com o produto perecível observou-se, primeiramente, que durante o processo de conservação do tomate cereja, via resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado, realizado pelo SIGEP, quando comparado com os tratamentos de conservação pela geladeira a 6 °C e ambiente externo, não houve diferenças significativas, entre os referidos tratamentos, para as variáveis °Brix e $U_{B.U.}$ (%); enquanto que para as variáveis pH e AT (%) estas diferenças foram significativas entre os tratamentos empregados na conservação do produto perecível: tomate cereja, tanto para os frutos com estado de maturação verde quanto para os frutos com estágio de maturação colorido.

Segundo, que no processo de conservação do produto perecível, citado acima, por resfriamento do ar por água gelada em comparação com os tratamentos de conservação em geladeira na temperatura de 6 °C e em ambiente externo houve, somente, diferença significativa, entre os tratamentos, para a variável acidez titulável (=AT (%)) no tomate cereja com estágio de maturação inicial (colorido); não havendo, portanto, diferença entre os tratamentos para as demais variáveis e; nenhuma diferença entre os tratamentos para todas as variáveis, quando o estágio de maturação dos frutos era verde.

Com relação ao último processo de conservação, isto é, preservação do produto perecível por resfriamento evaporativo do ar quando comparado com os outros dois tratamentos: conservação em geladeira a 6 °C e conservação em ambiente externo; só houve, novamente, diferença significativa entre os três tratamentos, para a variável pH no tomate cereja com grau de maturação inicial (colorido), não ocorrendo, portanto diferenças para as demais variáveis (°Brix, AT (%) e $U_{B.U.}$ (%)) e; para todas as variáveis quando os frutos estavam nos graus de maturação verde e intermediário.

Finalmente, para o estudos de caso deste produto perecível, quando se comparou somente os tratamentos de conservação do tomate cereja, realizados no SIGEP, isto é, os três diferentes tipos de resfriamento do ar (contato direto com evaporador aletado, água gelada e evaporativo) pode-se concluir que somente a variável pH sofreu alterações significativas reais, não casuais, quando os frutos de tomate foram submetidos aos três processos distintos de resfriamento; enquanto que para as demais variáveis (°Brix, AT(%) e $U_{B.U.}$ (%)) não sofreram interferências significativas provocadas pelos tratamentos de conservação do produto via diferentes tipos de resfriamento do ar, para o tomate cereja no grau de maturação verde. Já, para o tomate no estágio de

maturação inicial (colorido) houve diferenças significativas entre os tratamentos produzidos pelo SIGEP de resfriamento do ar, para as variáveis pH, AT (%) e $U_{B.U.}$ (%) e, portanto, não ocorreram diferenças significativas, somente, quando a variável analisada foi o $^{\circ}$ BRIX, entre os referidos tratamentos.

Quanto ao estudo de caso para o produto deteriorável: sementes de soja, embora com os resultados dos testes de Germinação e Vigor não se comportando como uma distribuição normal e que a referida variedade (Foscarin) sendo muito sensível aos tratamentos de umidificação e resfriamento em geladeira a -1° C, como pode ser observado pelos resultados e segundo informações do próprio fabricante (SEMEL); provocando índices abaixo daqueles permitidos pela legislação, em termos de porcentagem de Germinação e Vigor; antes mesmos de serem submetidos aos processos de secagem; pode-se, todavia, concluir que, primeiro, houve diferenças significativas entre os tratamentos prévios e as secagens, pelos diferentes processos gerados pelo SIGEP, isto é, aquecimento do ar por resistências elétricas com altas vazões, resfriamento do ar por contato direto com evaporador aletado e, por último, aquecimento do ar por resistências elétricas com baixas vazões; para a variável $U_{B.U.}$ (%).

Outrossim, observou-se, também, diferenças significativas entre os blocos (diferentes velocidades) nos dois processos distintos de secagem por aquecimento do ar, isto é, as médias estimadas da variável umidade em base úmida (%) foram diferentes entre si para as velocidades de 3,5;2,5;1,5 e 1 m/s; enquanto não houve diferença significativa, ao nível de 5 % de probabilidade, entre as velocidades de 1 e 0,5 m/s.

Encerrando, pode-se dizer que, embora, prejudicado pelas características intrínsecas das sementes de soja, para a variedade Foscarin, as avaliações energéticas e exergéticas podem ser aplicadas, perfeitamente, em estudos com produtos agrícolas, sem qualquer prejuízo para ambas as metodologias.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS - NBR 6023. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 19 p. Rio de Janeiro, RJ. AGO/1989
- _____. APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÕES E TESES - PNBR 14:02.02-002. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 18 p. Rio de Janeiro, RJ. OUT/1984.
- ABRAVA. Alimento: O caminho do desperdício. REVISTA ABRAVA 17 (133): p. 14 - 16. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento - ABRAVA. São Paulo, SP. 1993.
- AGRAWAL, K.K. & RAO, H.V. A computer model of psychrometric properties of air. TRANSACTIONS OF THE ASAE. p. 67-69, 73. American Society of Agricultural Engineers - ASAE. St. Joseph, Michigan - USA, 1974.
- AHERN, J.E. THE EXERGY METHOD OF ENERGY SYSTEMS ANALYSIS. John Wiley & Sons. 295 p. New York, NY. 1980.
- AHRENDTS, J. Reference States. ENERGY 5 (8 - 9): p. 667 - 677. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- ASAE. Psychrometric Data. STANDARDS OF THE ASAE D 271.2. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, p. 32-34. St. Joseph, MI. 1986
- ASHRAE. HANDBOOK OF FUNDAMENTALS. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, VENTILATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 967p. Atlanta, GA. 1981.
- AURACHER, H. Fundamental Aspects of Exergy Application to the Analysis and Optimization of Energy Processes. HEAT RECOVERY SYSTEMS. 4 (5): p.323-7, 1984.
- BAHIA, E.T. ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGETICA DE INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1985.

- BEJAN, A. A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer. ASME, JOURNAL OF HEAT TRANSFER 101(4): p. 718 - 725. American Society of Mechanical Engineers. New York, NY. 1979.
- _____. Second law analysis in heat transfer. ENERGY 5 (8 - 9): p. 721 - 732. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- _____. ENTROPY GENERATION THROUGH HEAT AND FLUID FLOW. John Wiley & Sons. 748 p. New York, NY. 1982.
- _____. ADVANCED ENGINEERING THERMODYNAMICS. John Wiley & Sons, 758 p. New York, NY. 1988.
- BIAGI, J.D. & SILVA, I.J.O. da. Software para determinar as propriedades psicrométricas do ar. ANAIS DO XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA. Vol. II, p. 1161-1175. ESALQ/USP. Piracicaba - SP, 1990.
- BIAGI, J.D.; VALENTINI, S.R.T. & QUEIRÓS, D.M. Secagem de produtos agrícolas. Em "INTRODUÇÃO À ENGENHARIA AGRÍCOLA". Coord. por L.A.B.CORTEZ e P.S.G.MAGALHÃES, Parte 4, Cap. 3, p. 245 - 266. 2ª ed. Editora da UNICAMP. Campinas, SP. 1993.
- BLECHER, B. Fome. JORNAL FOLHA DE SÃO PAULO - SUPLEMENTO ESPECIAL B: p. 1 - 8. Folha de São Paulo. São Paulo, SP. 19/12/1993.
- BOCK, H. Efficiency in Air-Conditioning and the New Thermodynamic Function "Exergy". BULLETIN DE L'INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID (2): p. 51-60, Abano, 1957.
- BOREL, L. ECONOMIC ÉNERGÉTIQUE ET EXERGÉTIQUE. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 42 p. Lausanne. 1977.
- _____. Théorie Générale de l'Énergie et Applications Pratiques. ENTROPIE, 15 (87): p. 4 - 16, 1979.
- BOSNJAKOVIC, F. TECHNICAL THERMODYNAMIC. Holt, Rinehart and Winston, 1965.
- BULLOCK, C.E. The Application of Availability Analysis to Psychrometric Processes. ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, VENTILATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. SYMPOSIUM PAPER - LO.73 (4):p. 5-16, Atlanta, GA, 1973.
- CIMBLERIS, B. EXERGIA: LIÇÕES DE EXERGÉTICA. Instituto de Pesquisas Radioativas, 94 p. Belo Horizonte, MG. 1969.
- _____. DISPONIBILIDADE TERMODINÂMICA. EEUFMG, 27 p. Belo Horizonte, MG. 1980.
- _____. História dos Conceitos de Disponibilidade Termodinâmica. CIÊNCIA E CULTURA33 (6): p. 784-89, Rio de Janeiro, RJ. 1981.

- C.L.A.V. REGRAS PARA ANÁLISE DE SEMENTES Coordenação de Laboratório de Análise Vegetal. DNDV/SNDA/MARA. 365 p. Brasília, DF. 1992.
- CORTEZ, L.A.B. Introdução ao Uso da Avaliação Exergetica em Problemas de Engenharia Agrícola: O Caso da Combustão para Geração de Potência e da Refrigeração por Compressão Mecânica. SBEA. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. vol. I, p. 203-225, Piracicaba, SP. 1990.
- DOEBELIN, E.O. MEASUREMENT SYSTEMS - APPLICATIONS AND DESIGN. McGraw-Hill Book Company. 3rd Edition, 876 p. New York, NY. USA. 1983.
- EVANS, R.B. Thermoeconomic isolation and essergy analysis. ENERGY 5 (8 - 9): p. 805 - 821. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- FRATZSCHER, W. Exergetical Efficiency. BWK 13 (11): p. 486 - 493, Germain, 1961.
- FREDRIKSSON, R. The Technological Potential for More Efficient Use of Energy in Industry. ENERGY TECHNOLOGY 1: p. 7-10, Stockholm, Sweden, 1983.
- GAGGIOLI, R.A. Efficiency and Costing, Second Law Analysis of Processes. American Chemical Society, AMERICAN CHEMICAL SOCIETY SYMPOSIUM SERIES n^o 235. 460 p. Washington, D.C., 1983.
- GAGGIOLI, R.A. & WEPFER, W.J. Exergy economics. ENERGY 5 (8 - 9): p. 823 - 837. 1980. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- GALLO, W.L.R. ANÁLISE EXERGÉTICA DE MOTORES A GASOLINA E ALCOOL. 258 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 1990.
- GALLO, W.L.R. & MILANEZ, L.F. Choice of a Reference State for Exergetic Analysis. Great Britain. ENERGY 15 (2): p. 113-121. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1990.
- _____. Eficiência Exergetica: Conceitos e Aplicações. ANAIS DO III ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS: p. 1045-50, Itapema, SC. 1990.
- GOMES, F.P. A ESTATÍSTICA MODERNA NA PESQUISA AGROPECUÁRIA. 3^a ed. 162 p. POTAFOS - Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP. 1987.
- GOULD, W.A. TOMATO PRODUCTION, PROCESSING, AND QUALITY EVALUATION. 445p. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, CT. 1974
- HAYWOOD, R.W. A critical review of the theorems of thermodynamic availability, with concise formulations. Part 1. Availability. THE JOURNAL OF MECHANICAL

ENGINEERING SCIENCE 16(3): p. 160 - 173. IME / Mechanical Engineering Publications Ltd. London, England. 1974.

_____. A critical review of the theorems of thermodynamic availability, with concise formulations. Part 2. Irreversibility. THE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE 16(4): p. 258 - 267. IME/Mechanical Engineering Publications Ltd. London, England. 1974.

HEVERT, H.W. & HEVERT, S.C. Second law analysis: an alternative indicator of system efficiency. ENERGY 5 (8 - 9): p. 865 - 873. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.

HINES, W.W. & MONTGOMERY, D.C. PROBABILITY AND STATISTICS IN ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCE. 2nd ed. 634 p. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY. 1980.

HONÓRIO, S.L. Tecnologia de pós-colheita de produtos vegetais perecíveis. Em "INTRODUÇÃO À ENGENHARIA AGRÍCOLA". Coord. por L.A.B.CORTEZ e P.S.G.MAGALHÃES. Editora da UNICAMP, 2^a ed. Parte 4. Cap. 2, p. 235 - 243. Campinas, SP. 1993.

HORLOCK, J.H. The Rational Efficiency of Power Plants with External Combustion. PROCEEDINGS OF INSTRUMENTATION FOR MECHANICAL ENGINEERS, 178, (Part 3I), p. 43. 1963/64

JACOBS, M.B. THE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF FOOD AND FOOD PRODUCTS. Vol. II, p. 1232-44. Interscience Publishers, Inc. New York, N.Y. 1951.

JORGE, J.T. Armazenagem a seco. Em "INTRODUÇÃO À ENGENHARIA AGRÍCOLA". Coord. por L.A.B.CORTEZ e P.S.G.MAGALHÃES. Editora da UNICAMP, 2^a ed. Parte 4, Cap. 5, p. 285 - 320. Campinas, SP. 1993.

KESTIN, J. Available work in geothermal energy. REPORT N^o CATMEC/20 (COO-4051-25), Division of Engineering, Brown University, Providence, RI, 07/1978.

_____. Availability: the concept and associated terminology. ENERGY 5 (8 - 9): p. 679 - 692. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980

KOTAS, T.J. Exergy Concepts for thermal plants. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW 2 (3): p. 105 - 114. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, England. 09/1980.

_____. Exergy Criteria of Performance for Thermal Plant. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW 2 (4): p. 147-163. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, England. 12/1980.

_____. THE EXERGY METHOD OF THERMAL PLANT ANALYSIS. 296p. Butterworths Academic Press. London, England. 1985.

- LARSON, D.L. & CORTEZ, L.A.B. Exergy Analysis: Essential to Effective Energy Management. TRANSACTIONS OF THE ASAE 38 (4): p. 1173-1178. ASAE, St. Joseph, MI. 1995.
- McQUISTON, F.C. & PARKER, J.D. HEATING, VENTILATING, AND AIR CONDITIONING: ANALYSIS AND DESIGN. 2ND ed. 666 p. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY. 1982.
- MORAN, M. AVAILABILITY ANALYSIS: A GUIDE TO EFFICIENT ENERGY USE. 260 p. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ. 1982.
- MOSER, F.L. & SCHNITZER, H. HEAT PUMPS IN INDUSTRY. 264 p. Elsevier. Amsterdam, Netherlands. 1985.
- NAGHDI, P.M. On the role of the second law of thermodynamics in mechanics materials. ENERGY 5 (8 - 9): p. 771 - 781. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- NEVERS, N. de & SEADER, J.D. Lost work: a measure of thermodynamic efficiency. ENERGY 5 (8 - 9): p. 757 - 769. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- NEVES F^o, L. de C. Resfriamento rápido de frutas e hortaliças. REVISTA ABRAVA 17 (133): p. 22 - 29. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. São Paulo, SP. 1993
- NETER, J.; WASSERMAN, W. & KUTNER, M.H. APPLIED LINEAR REGRESSION MODELS. 547 p. 1st ed. Richard D. Irwin, Inc. Homewood, IL. 1983.
- PARKER, J.D.; BOGGS, J.H. & BLICK, E.F. INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS AND HEAT TRANSFER. 612 p. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Mass. 1974
- PUZZI, D. ABASTECIMENTO E ARMAZENAGEM DE GRÃOS. 1986. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP. 603 p.
- REYNOLDS, W.C. THERMODYNAMIC PROPERTIES IN SI. 173 p. Stanford, DME-Stanford University, CA. 1979.
- RODRIGUEZ, L. Calculation of Available Energy Quantities. American Chemical Society. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY SYMPOSIUM SERIES N^o 122, p. 39 - 59. Washington, D.C. 1978.
- SANDO, C.E. USDA BULLETIN N^o 859: p. 22-36. United States Department of Agriculture. Washington, D.C. 1920.
- SAS. STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM USER'S GUIDE. 494 p. SAS Institute. Cary, NC, USA. 1979.
- SHERROD, P.H. NONLINEAR REGRESSION ANALYSIS PROGRAM. 19 p. 4410 Gerald Place. Nashville, TN. USA

- SILVA, A. da. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO (ÁGUA-AMÔNIA) PARA PRODUÇÃO DE GELO A PARTIR DE VAPOR DE PROCESSO. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 1994.
- SILVA, R.J. da & NEBRA, S.A. Exergetic Analysis of Clinker Burning Process in Cement Industry. PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS AND ECOLOGY (ENSEC'93). vol. 2: p. 739-745, Cracow, Poland. 1993.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. STATISTICAL METHODS. 507 p. 7th ed. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. USA. 1980
- STEVENS, M.A. Tomato flavor: Effects of genotype, cultural practices, and maturity at picking. Em: "EVALUATION OF QUALITY OF FRUITS AND VEGETABLES". Edited by H.E.Pattee. Cap. 14, p. 367 - 386. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, CT. 1985.
- SUSSMAN, M.V. Steady-flow availability and the standard chemical availability. ENERGY 5 (8 - 9): p. 791 - 802. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- SZARGUT, J. International progress in second law analysis. ENERGY 5 (8 - 9): p. 709 - 718. Pergamon Press Ltd. Oxford, England, 1980.
- SZARGUT, J. & PETELA, R. EGZERGIA. Wydawnictwa Nankowo Techniczne (W.N.T.). Warsaw, Poland. 1965.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D.R. & STEWARD, F.R. EXERGY ANALYSIS OF THERMAL, CHEMICAL, AND METALLURGICAL PROCESSES. 332 p. Hemisphere Publishing Co., New York, NY. 1988.
- THRELKELD, J.L. THERMAL ENVIRONMENTAL ENGINEERING. 495 p. 2nd edition. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ. 1970.
- VALERO, A. & LOZANO, M. APOSTILA: CURSO DE TERMOECONOMIA. D.I.M./A.M.M.T./U.Z. Zaragoza, Espanha e D.E./F.E.M./UNICAMP. Campinas, SP. Vol. I e II, 569p. 07/1994.
- VAN GOOL, W. Thermodynamic aspects of energy conservation. ENERGY 5 (8 - 9): p. 781 - 792. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 1980.
- VAN WYLEN, G.J. & SONNTAG, R.E. FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA CLÁSSICA. Editora Edgard Blucher Ltda. 566 p. 3^a ed. São Paulo, SP. 1976.
- WALL, G. Energy and material conversion in Sweden. ENERGY TECHNOLOGY 1: p. 3 - 5. National Swedish Board for Technical Development. Stockholm, Sweden. 1983.

WELTY, J.R.; WICKS, C.E. & WILSON, R.E. FUNDAMENTALS OF MOMENTUM, HEAT, AND MASS TRANSFER. 789 p. vol. II. John Wiley & Sons. New York, NY. 1976.

WEPFER, W.J.; GAGGIOLI, R.A. & OBERT, E.F. Proper Evaluation of Available Energy for HVAC. ASHRAE. TRANSACTIONS OF THE ASHRAE 85 (1): p. 214-230. Atlanta, GA. 1979.

.....

WILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI. Units. TRANSACTIONS OF THE ASAE. 19 (2), p. 318-321, 325. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, USA. 1976.

WORSØE-SCHMIDT, P. Thermo-Economic Analysis of Refrigeration and Heat Pump Systems. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION. 10 (4): p. 202-4. Butterworth & Co. Ltd. London, England. 1987.

ZONTA, E.P. & MACHADO, A.A. SANEST: SISTEMA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MICROCOMPUTADORES. 138 p. CIAGRI/ESALQ/USP. Piracicaba, SP. 1993..

APÊNDICES

AP-01. Características físicas do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP)

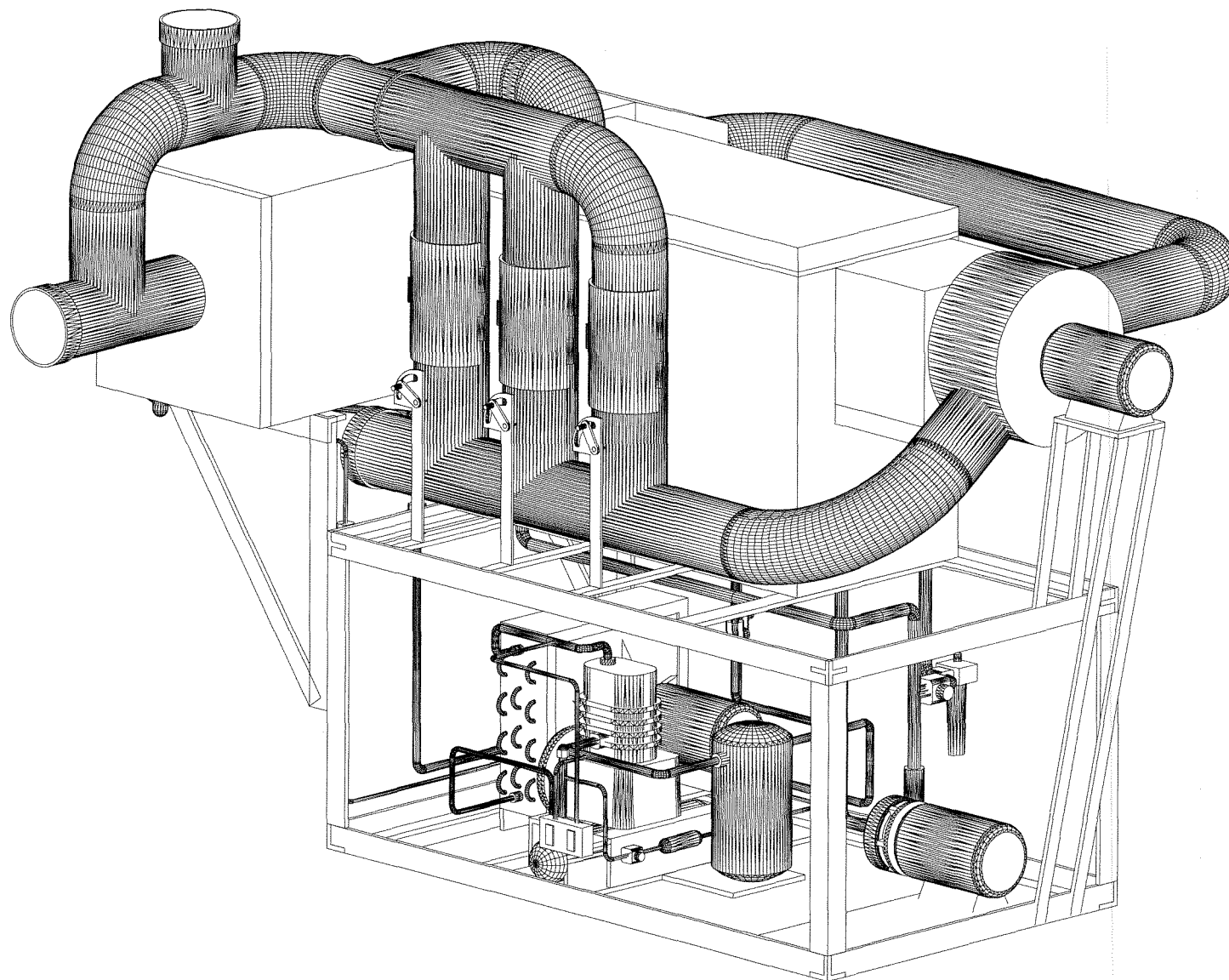


Figura AP - 1.1. Vista geral em 3D do Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP), sem apresentar os painéis de controle, instrumentação e proteção.

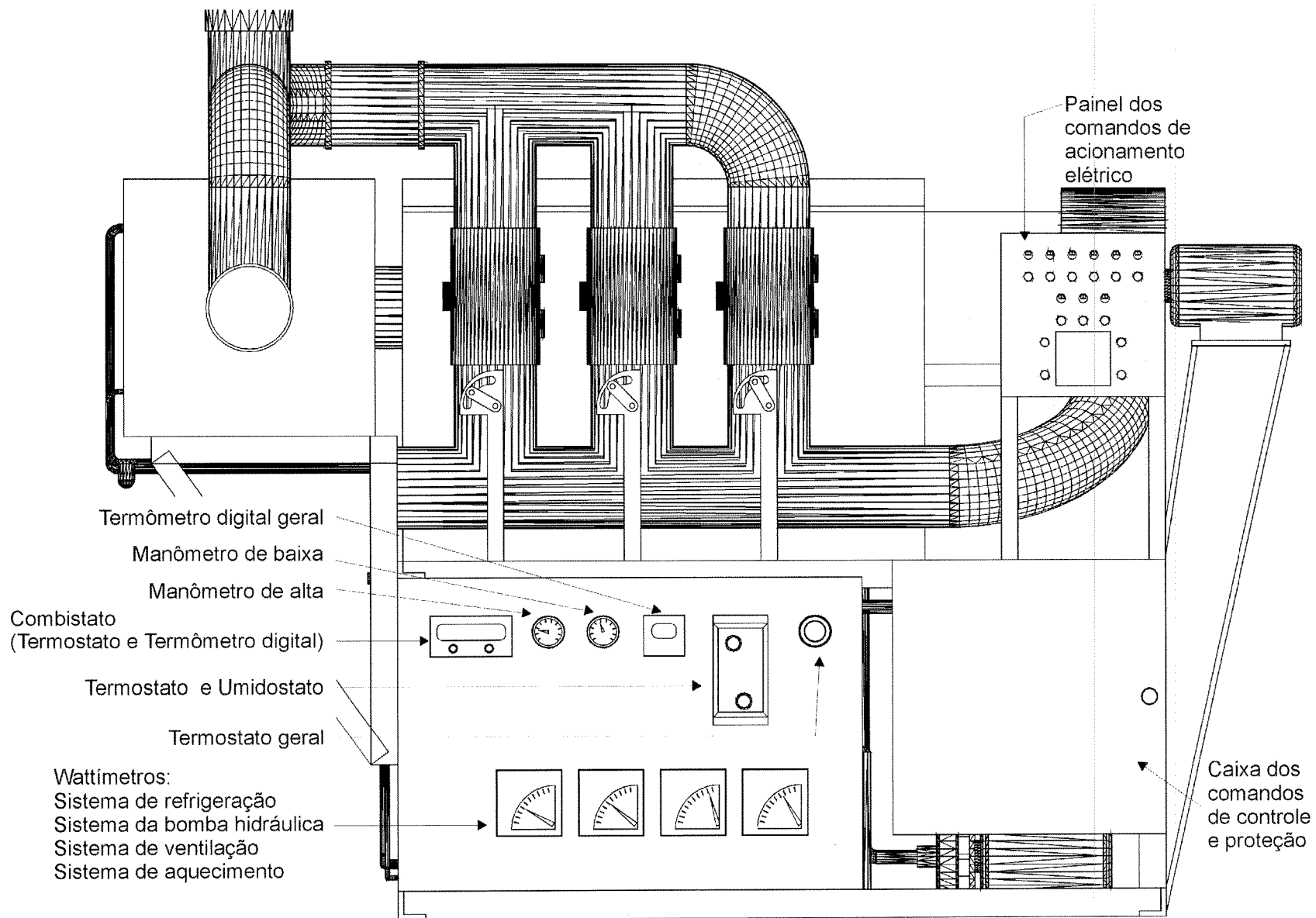


Figura AP - 1.2. Vista frontal do SIGEP com indicação de alguns de seus componentes.

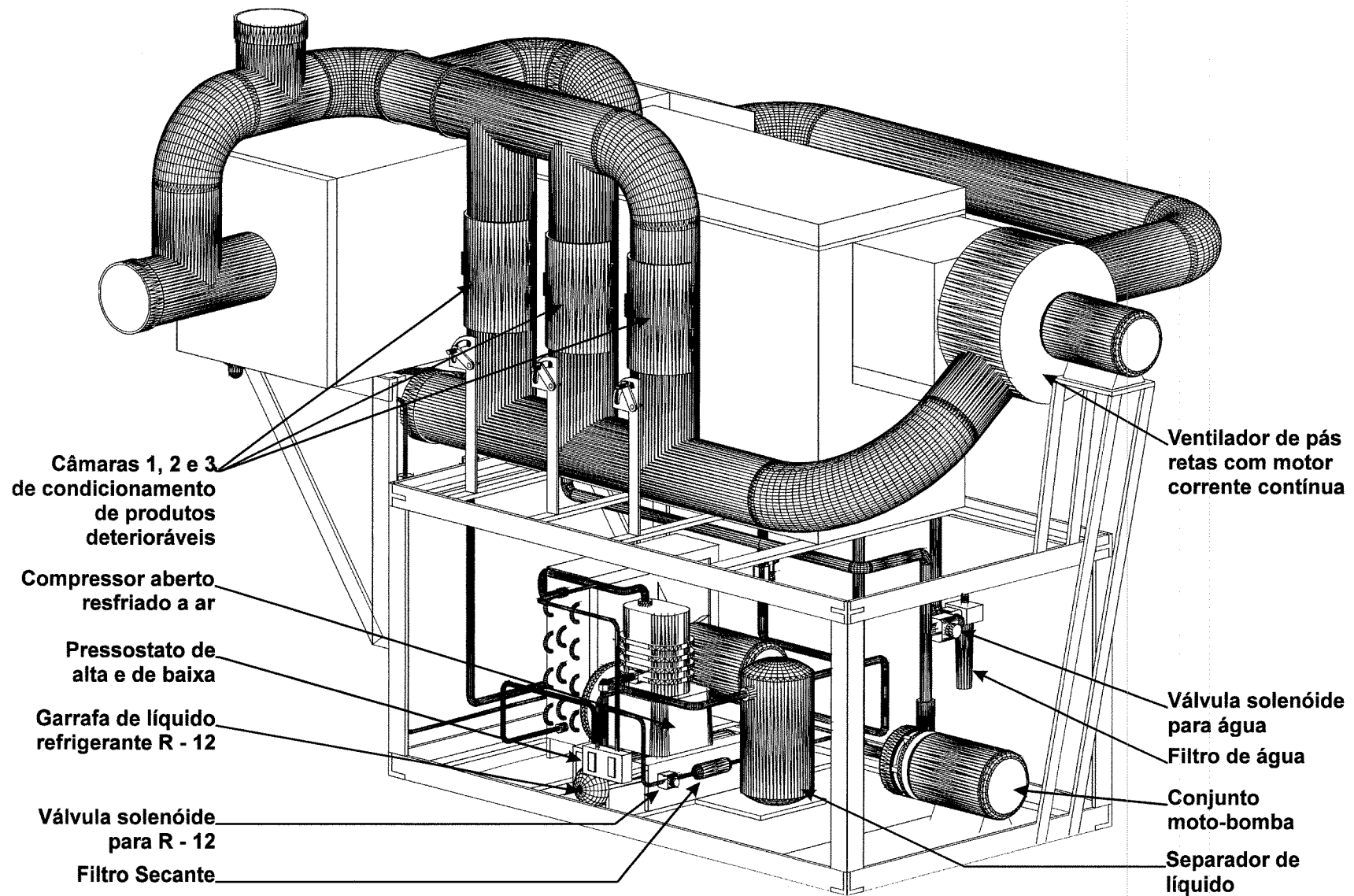


Figura AP - 1.3. Vista geral lateral em 3D do SIGEP, com indicação de alguns de seus componentes.

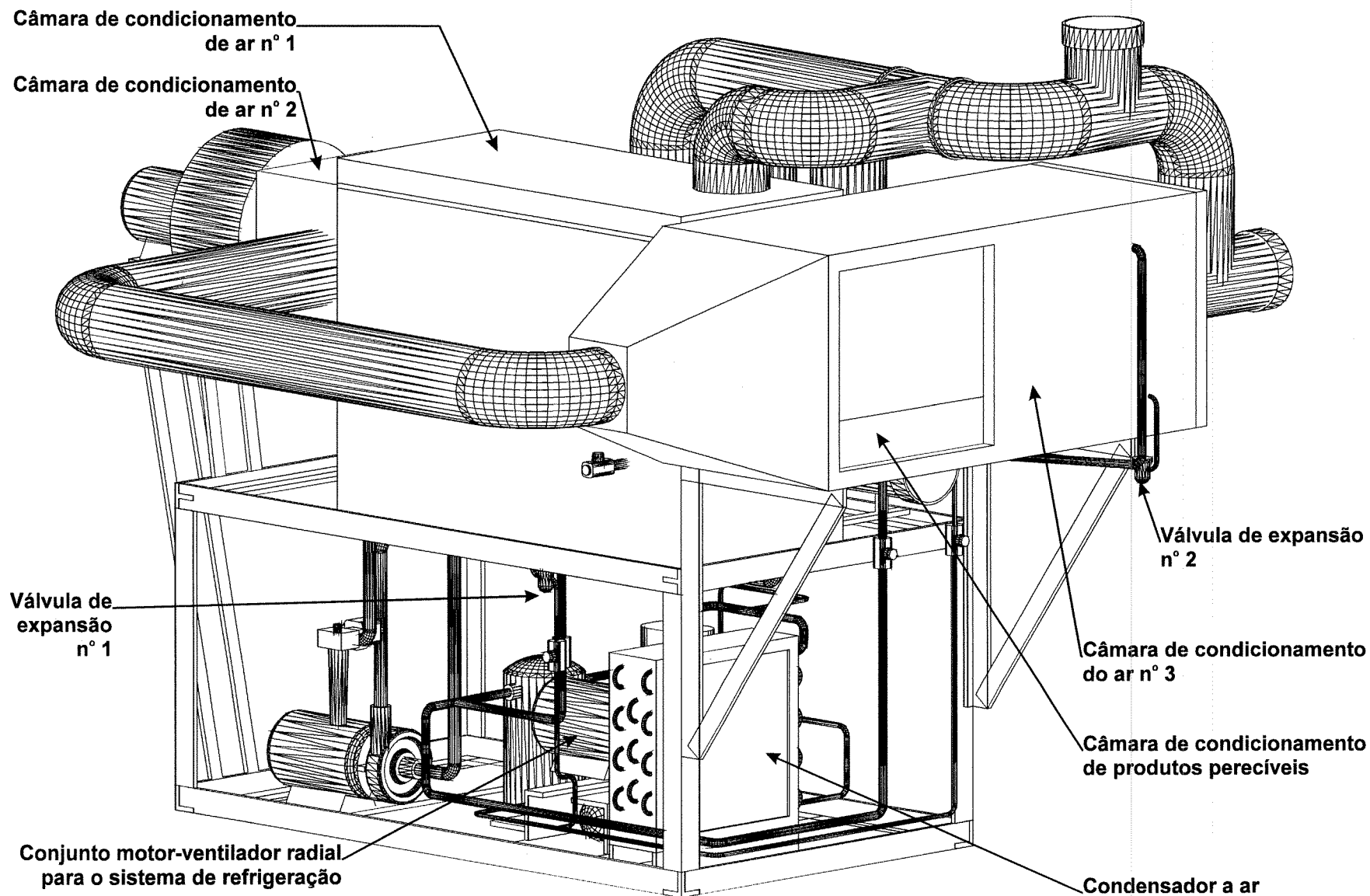


Figura AP - 1.4. Vista geral posterior em 3D do SIGEP, com indicações de alguns de seus componentes.

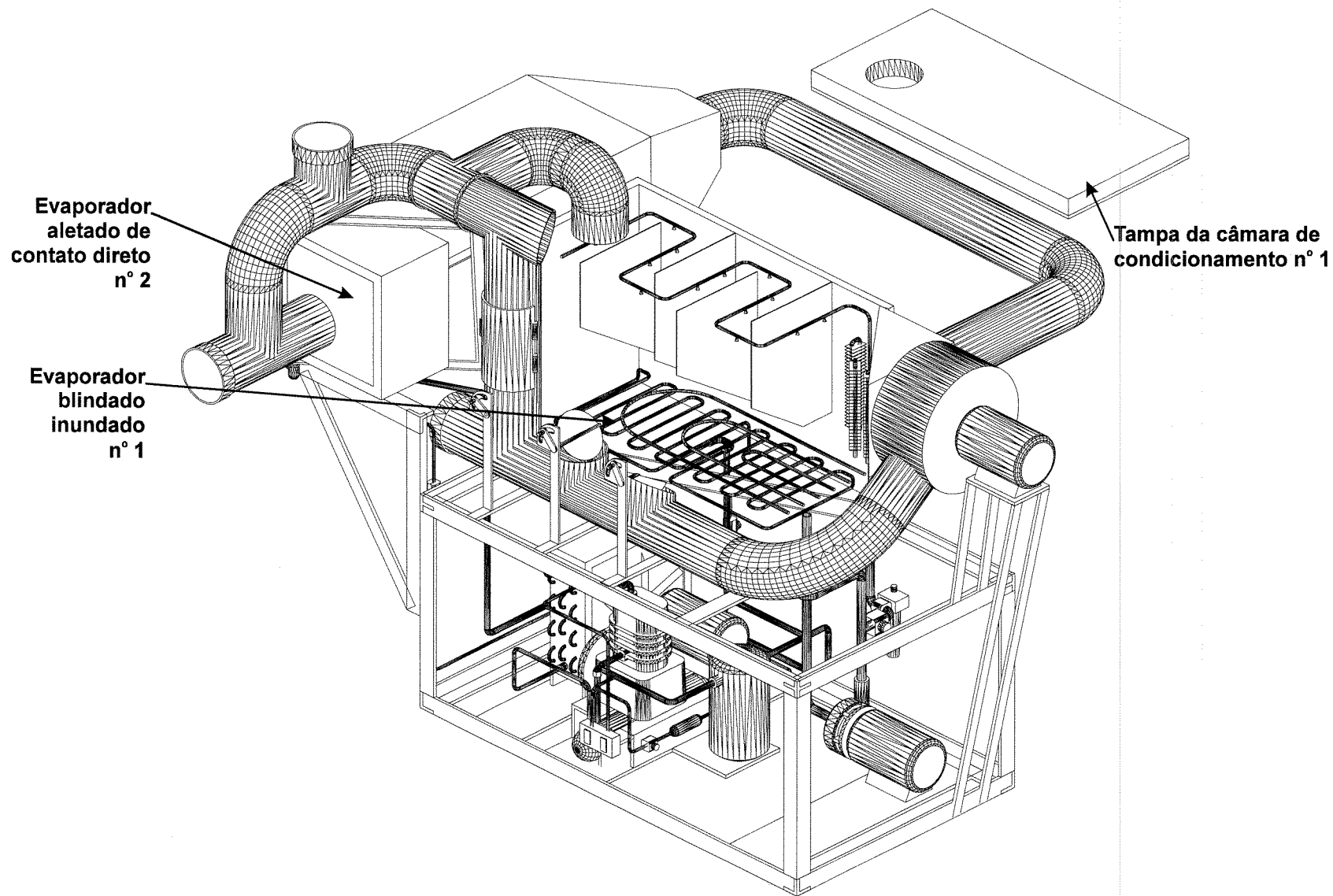


Figura AP - 1.5. Vista geral superior em 3D do SIGEP, com a indicação de alguns de seus componentes e corte em parte do equipamento.

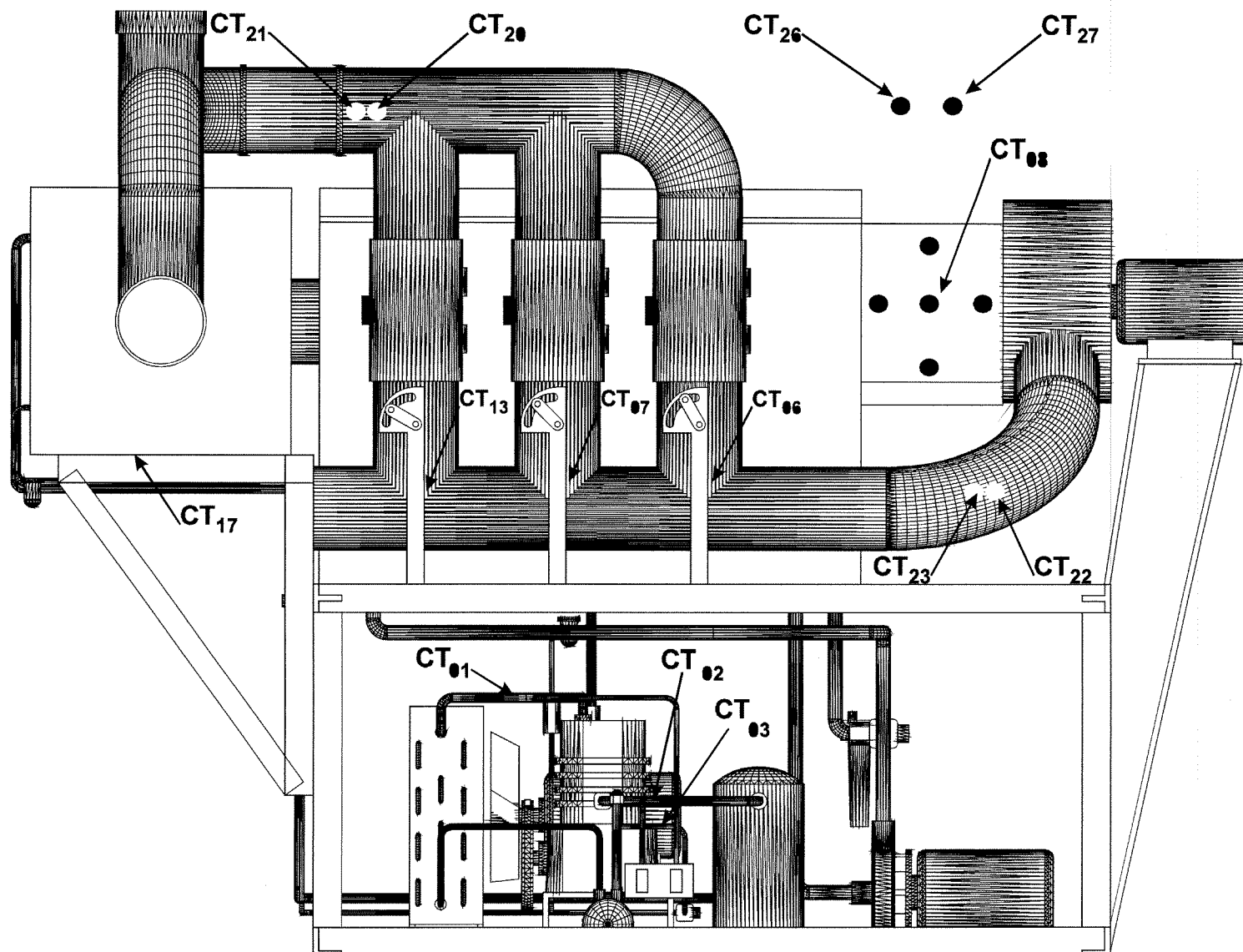


Figura AP - 1.6. Vista frontal do SIGEP, com a localização da instalação de alguns termopares

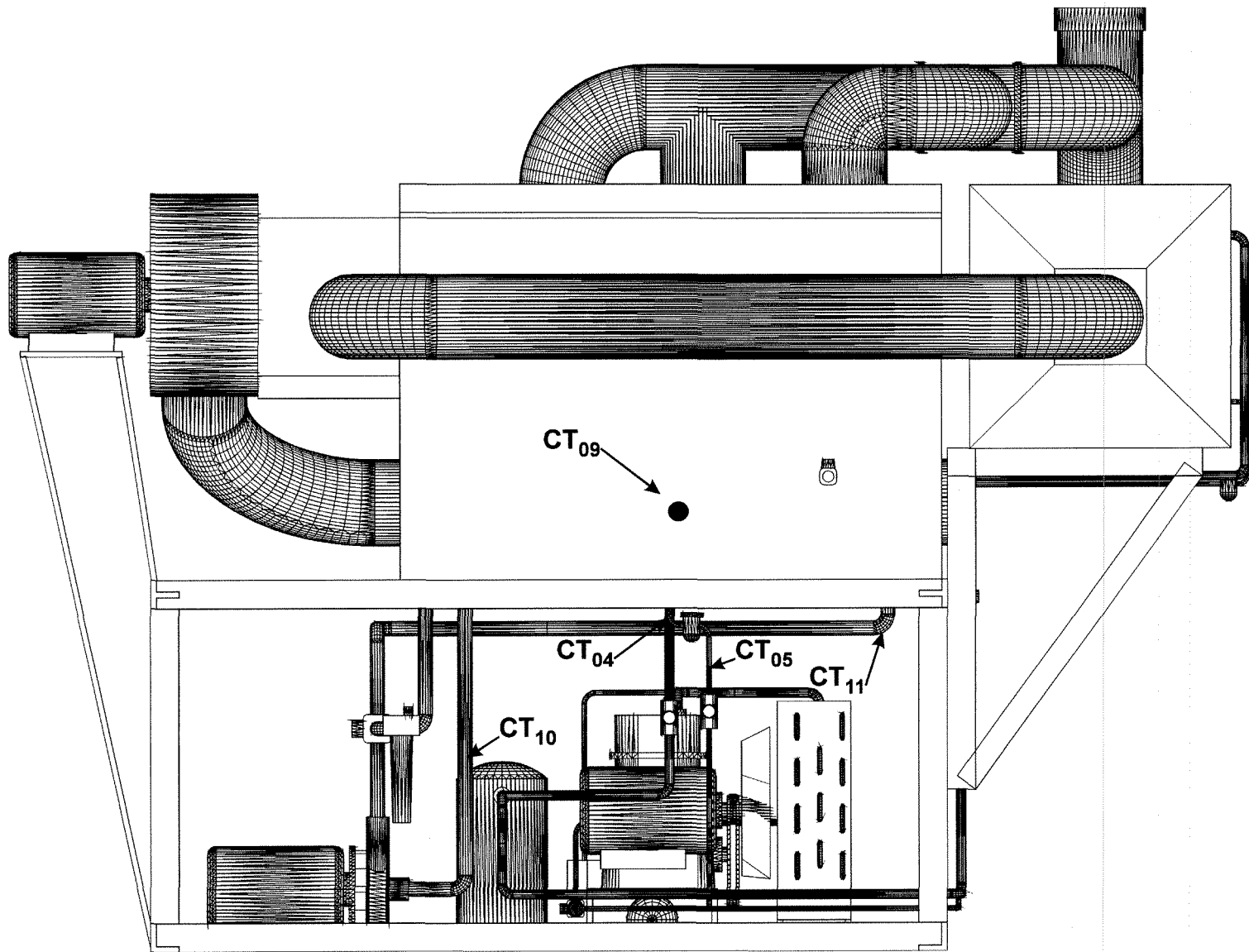


Figura AP - 1.7. Vista posterior do SIGEP com a localização da instalação de alguns termopares.

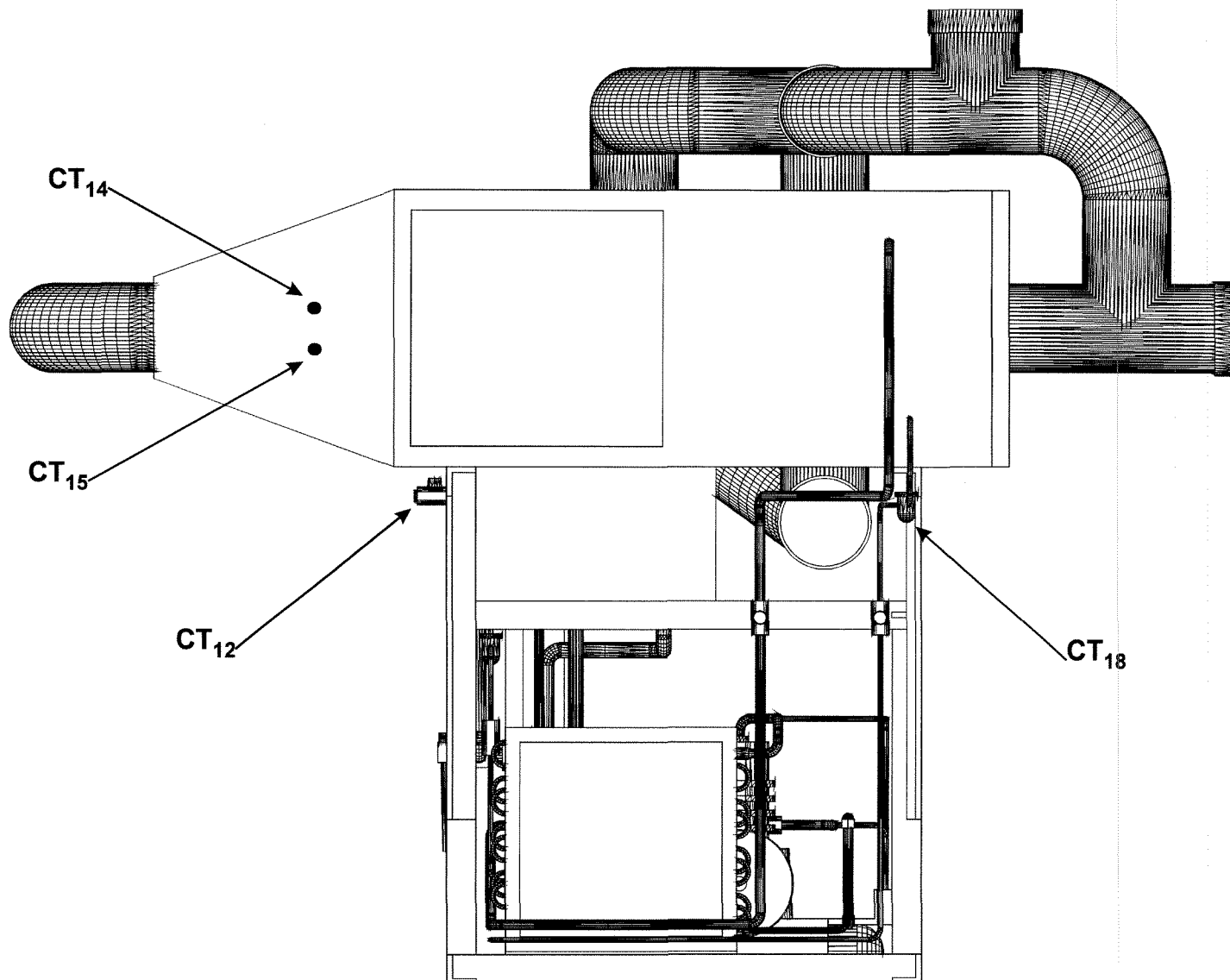


Figura AP - 1.8. Vista lateral esquerda do SIGEP, com a localização da instalação de alguns termopares.

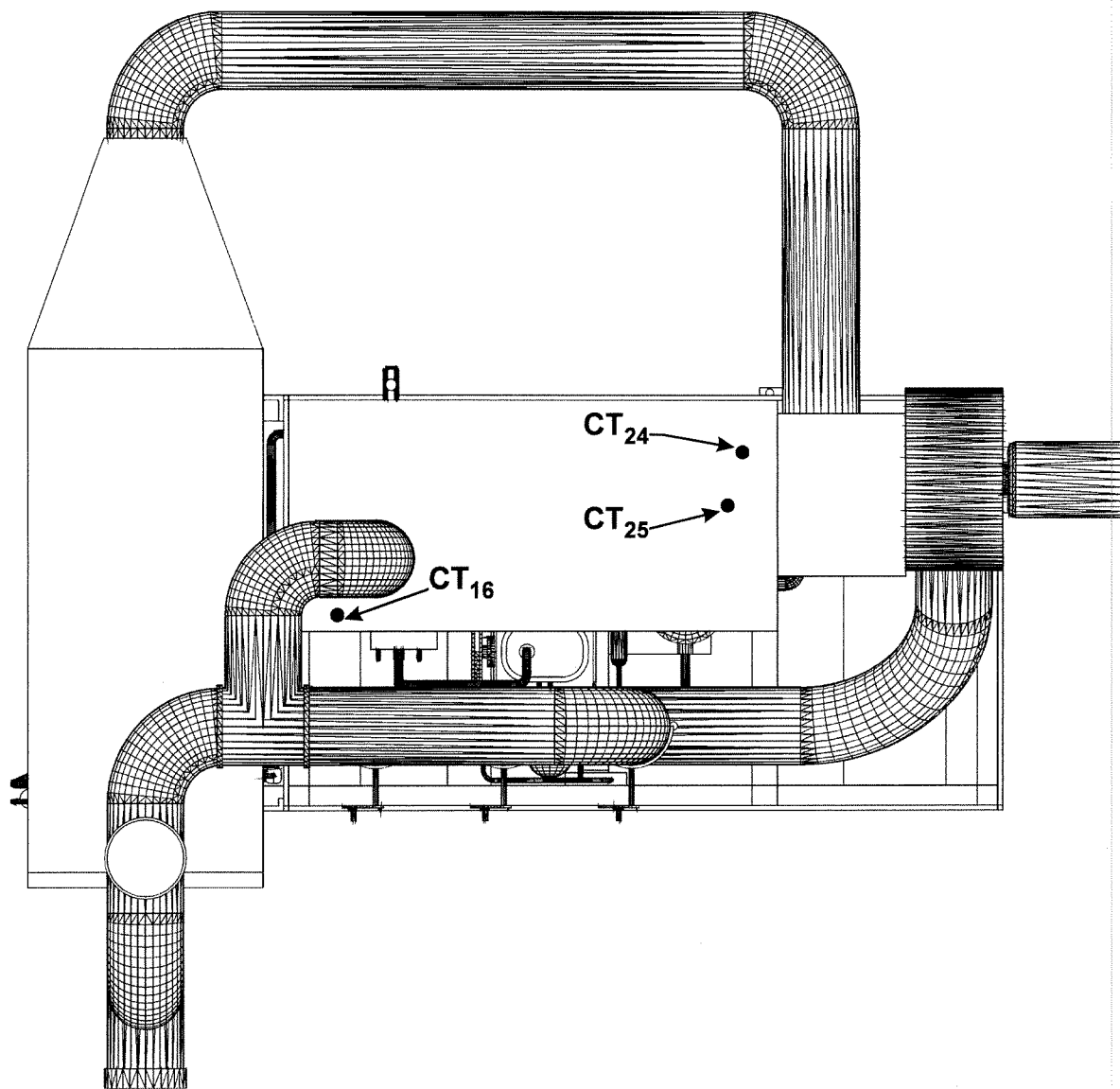


Figura AP - 1.9. Vista superior do SIGEP, com a localização da instalação de alguns termopares.

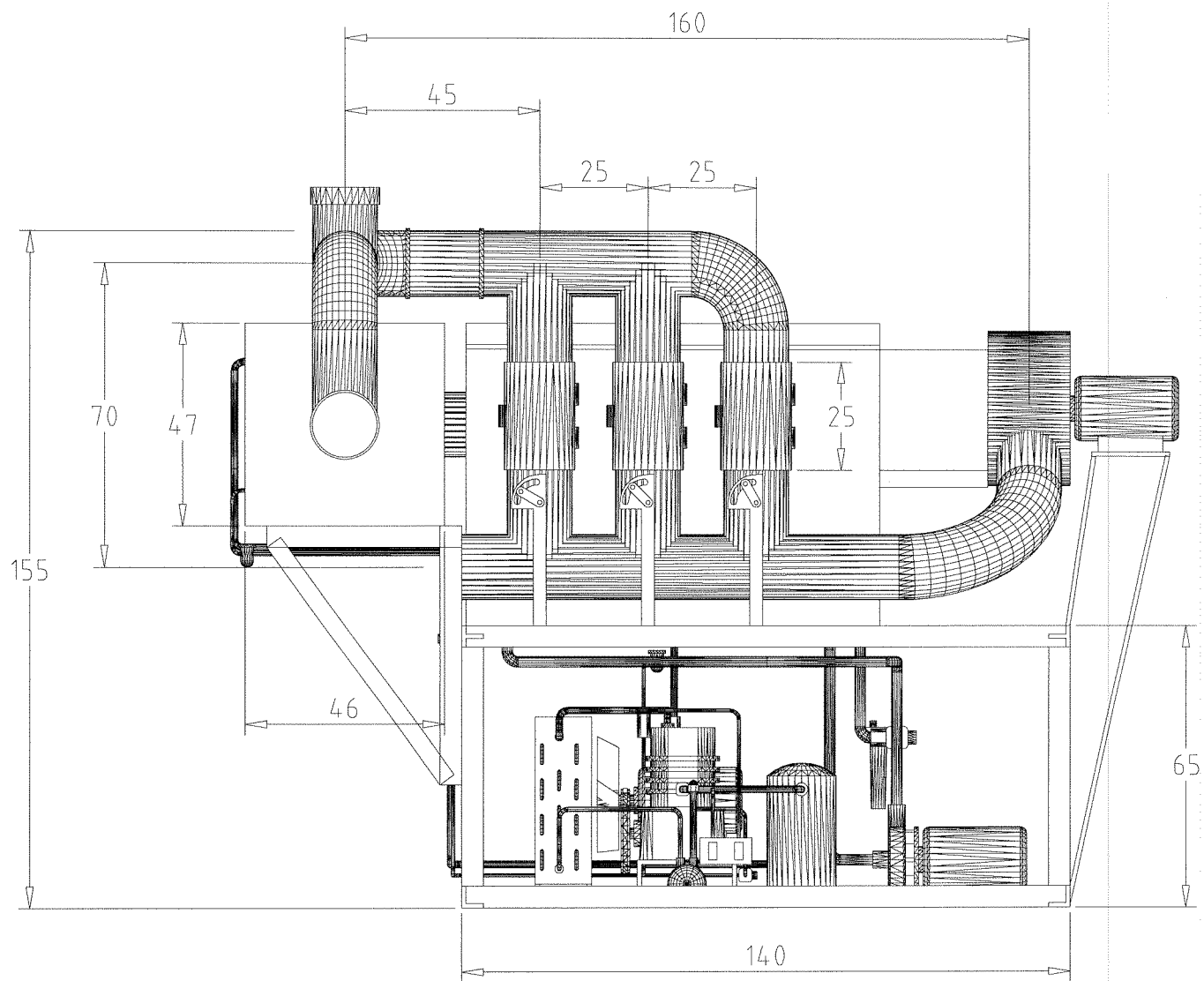


Figura AP - 1.10. Vista frontal do SIGEP com indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.

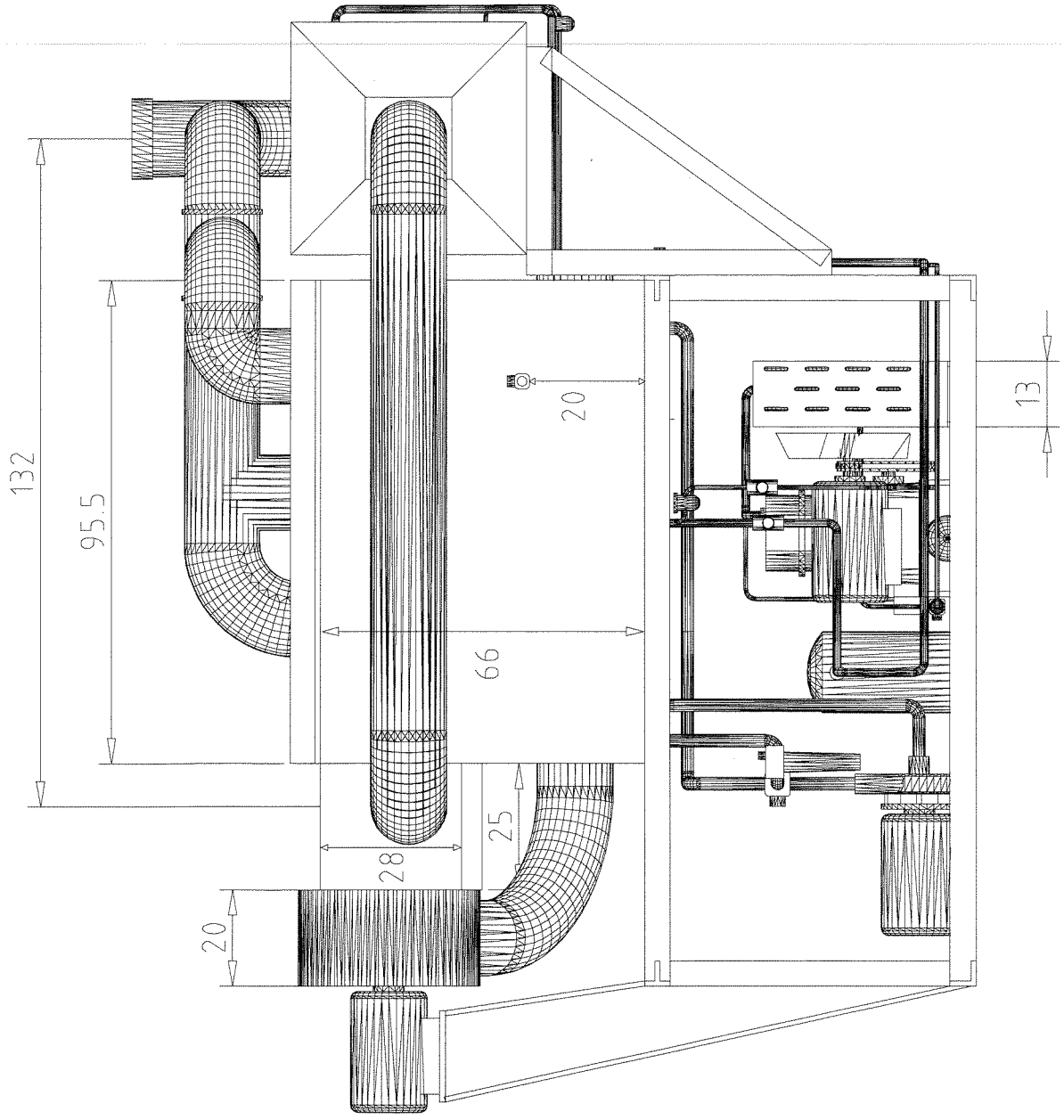


Figura AP - 1.11. Vista posterior do SIGEP com indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.

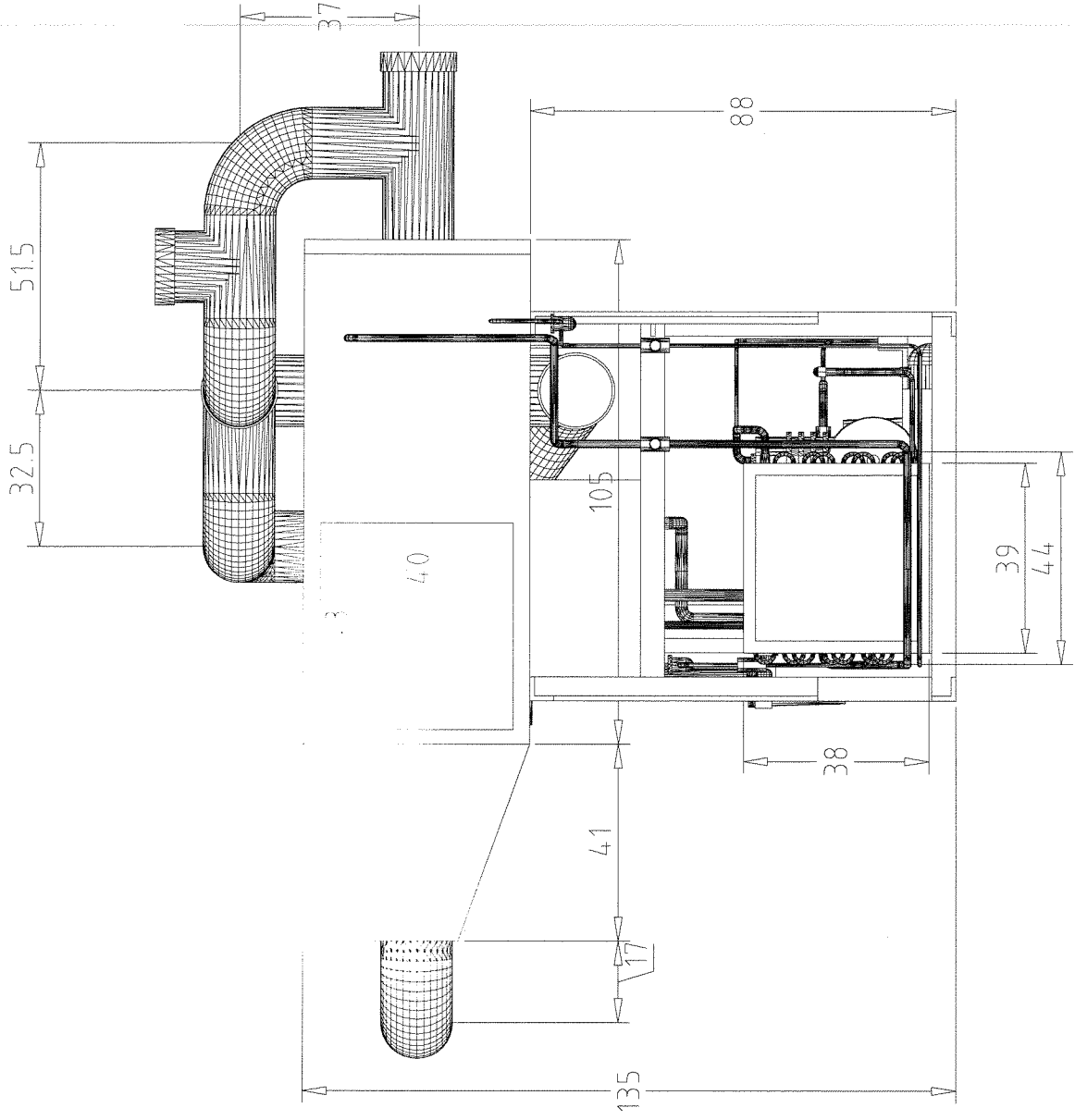


Figura AP - 1.12. Vista lateral esquerda do SIGEP com indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.

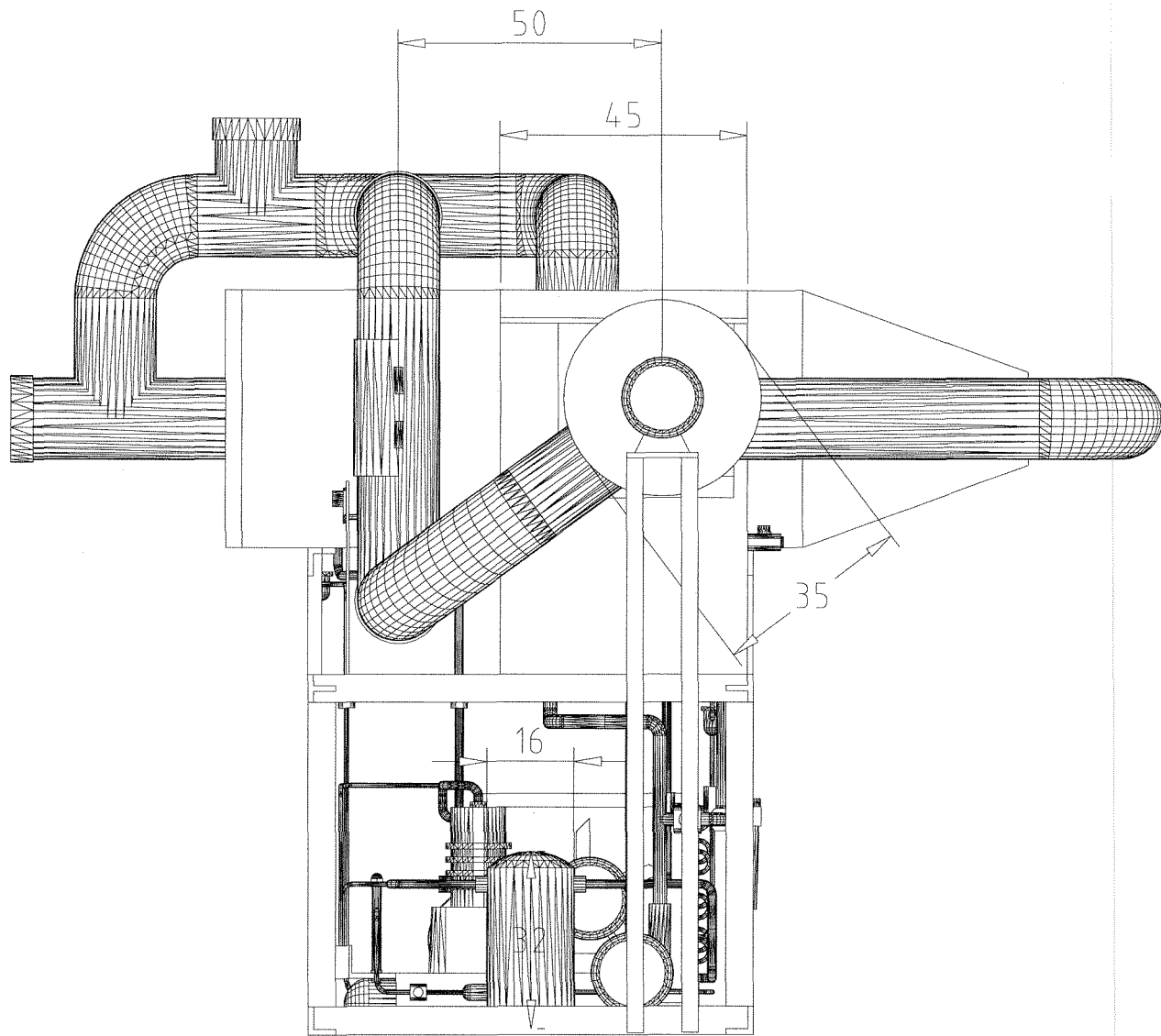


Figura AP - 1.13. Vista lateral direita do SIGEP com indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.

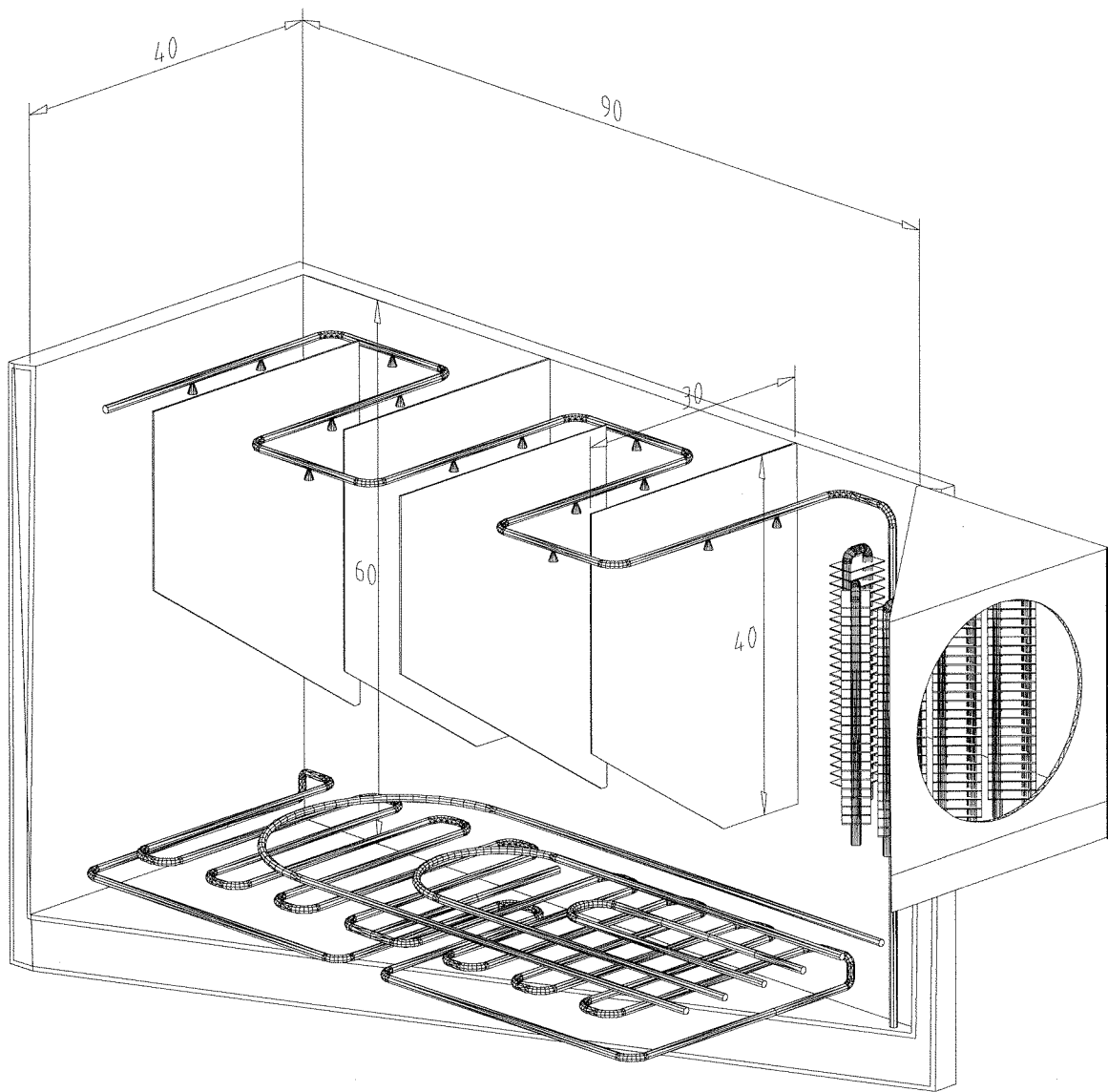


Figura AP - 1.14. Vista em corte, da câmara de condicionamento do ar 1 e 2 do SIGEP, com indicação das dimensões mais relevantes, medidas em cm.

**AP-02. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS PRINCIPAIS
EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

01. Características do conjunto motor-bomba-aspersores

- Motor:

Marca: - Kohlbach
Modelo: - 56
Categoria: - N
Isolamento: - B
Indução: - Monofásica
Voltagem: - 220 V
Amperagem: - 7,8 A
Potência: - 1,0 CV
Frequência: - 60 Hz
Rotação: - 3450 RPM

- Bomba:

Marca: - DARKA
Modelo: - CA-4
Série N^o: - 7BHG-112
Potência: - 1,0 CV
 ϕ_e : - 25,4 mm
 ϕ_s : - 25,4 mm

altura manométrica m.c.a.	vazão l/h
12	9200,0
15	8700,0
18	7900,0
21	6500,0
24	4000,0

- Aspersores:

Quantidade: - 11
Vazão: - 52,2 l/h
Pressão: - 1,25 kgf/cm²
 ϕ_e : - 19,05 mm
 ϕ_s : - 19,05 mm

02. Características do conjunto variador-motor-ventilador

- Variador:

Marca: - ASTEN
Modelo: - ALFA 1
Tensão: - 110 - 130 V
Corrente: - 15 A rms (máxima de saída)
Frequência: - 50/60 Hz
Conversor: - CA/CC
Tipo: - Ponte tiristorizada semi-controlada
Rendimento: - 88 %

- Motor:

Marca: - ASTEN
Modelo: - CC-01
Tensão: - 90 Vcc
Corrente: - 11,2 A
Potências: - 1010 W (absorvida na armadura)
- 735 W (mecânica)
- 120 W (absorvida no campo)

- Ventilador:

Marca: - COOPER
Modelo: - EC-2 TAR
Tipo: - Centrífugo - Pás retas
Rotação: - 3000 RPM
Diâmetro: - 350 mm.

03. Características do conjunto motor-compressor-unidade condensadora

- Motor:

Marca: KOHLBACH
Modelo: - 98
Categoria: - NB
Isolamento: - T
Indução: - Trifásica
Voltagem: - 220 V
Amperagem: - 5,0 A
Potência: - 1,5 CV
Frequência: - 60 Hz
Rotação: - 1725 RPM

- Compressor:

Marca: - BITZER FRIGOR
Modelo: - III-s
Tipo: - Aberto, cabeçote resfriado a ar, com dois cilindros
 ϕ_{POLIA} : - 75 mm
Capacidade: - 552 a 2202 J/s
 $T_{gás\ sucção}$: - 20 °C
 $T_{evaporação}$: - -26 a 0 °C
 $T_{condensação}$: - + 45 °C
Refrigerante: - R12(CCl₂F₂)

- Unidade condensadora:

Marca: - RÁDIO-FRIGOR
Modelo: - III
Tipo: - RF-210
Capacidade: - 2200 J/s (máxima)
Volume: - 8,0 l
Ventilador: - Axial-único
 $T_{ambiente}$: - + 35 °C
 $T_{evaporação}$: - 0 a - 10 °C

04. Características dos evaporadores aletado e inundado

- Evaporador aletado:

Marca: - TRINEVA
Modelo: - FTL-3
Tipo: - cobre/aletas em alumínio
Capacidade: - 2500 J/s (máxima)
Área: - 6,4 m²

■ Evaporador inundado:

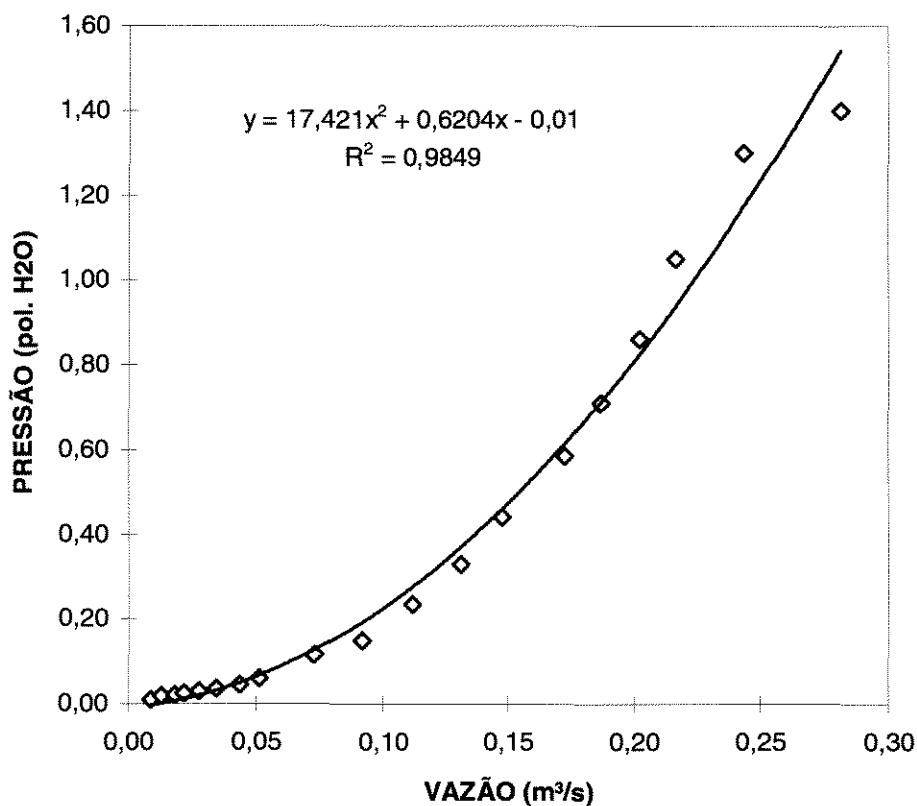
Marca: - fabricação própria
Modelo: - grade
Tipo: - inundado
Tubulação: - principal: $\phi = 25,4$ mm (cobre)
 ■ secundária: $\phi = 19,05$ mm (cobre)
Capacidade: - 2500 J/s
Comprimento: - 14,40 m.

AP-03. DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO TOTAL NO SIGEP

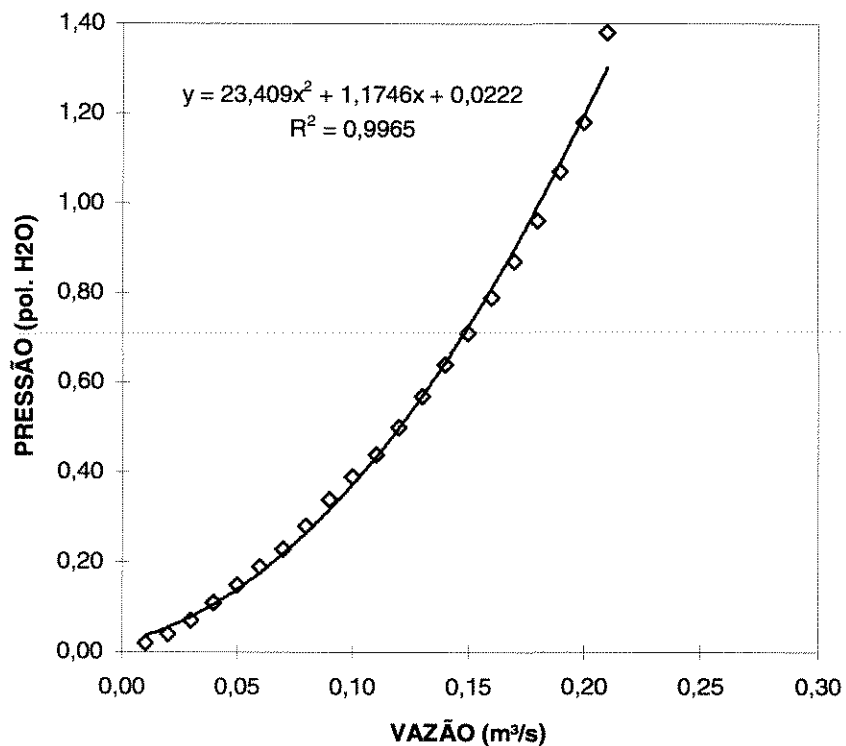
Utilizando-se da teoria desenvolvida por Bernoulli e descrita por ASHRAE (1981); McQUISTON & PARKER (1982) e PARKER, BOGGS & BLICK (1974) determinou-se, experimentalmente, a pressão total gerada dentro do SIGEP, nos diferentes percursos usados para a execução de cada processo de interesse, com a finalidade de dar subsídios ao cálculo da exergia do ar de saída.

Com o auxílio do manômetro inclinado DWYER e, através da variação da velocidade do ventilador, gerou-se, para cada percurso de cada processo realizado no SIGEP, um grupo de dados de velocidade e pressão, com os quais determinou-se a pressão total do sistema em função da vazão, calculada pelo produto da velocidade pela área da seção da tubulação.

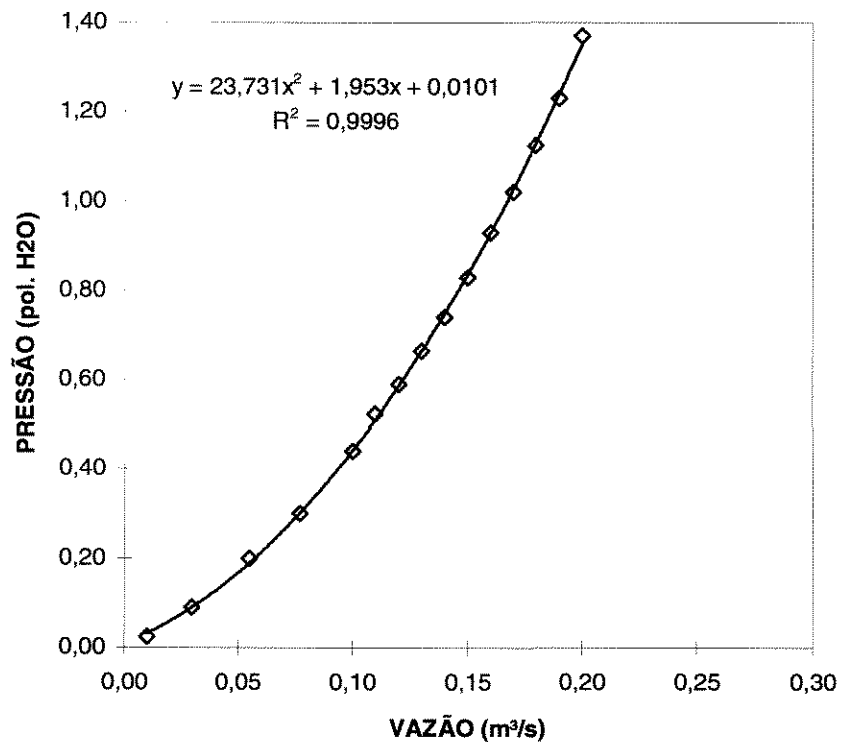
De posse dos resultados experimentais construiu-se curvas características (ΔP versus vazão) de cada processo e respectivo percurso, quando, então a pressão total era a soma das pressões estáticas e dinâmicas.



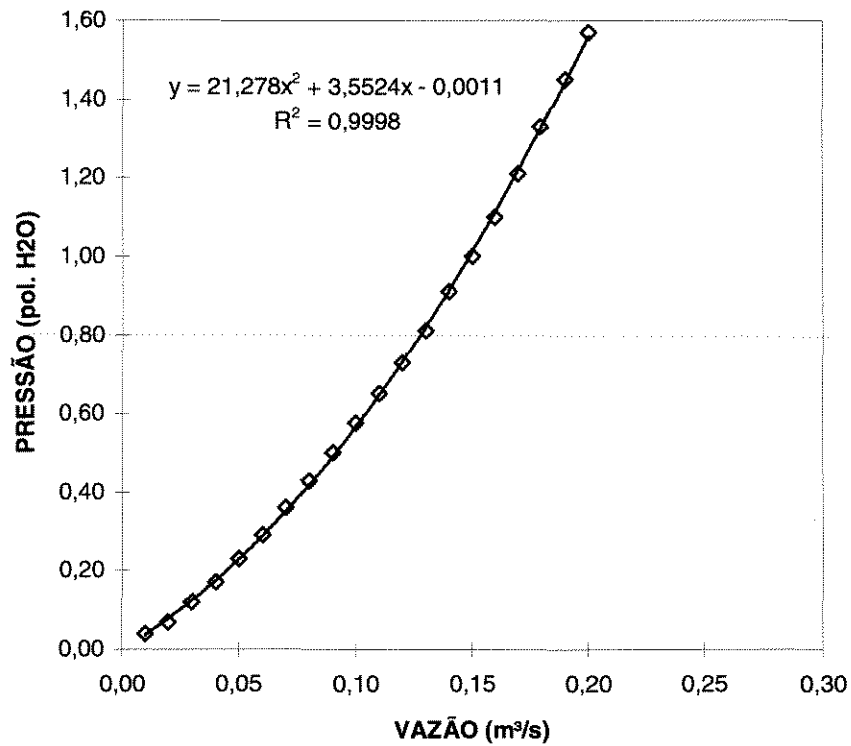
AP - 03.01 . Pressão Total do Sistema (pol. H₂O) para diferentes vazões (m³/s), no percurso nº1



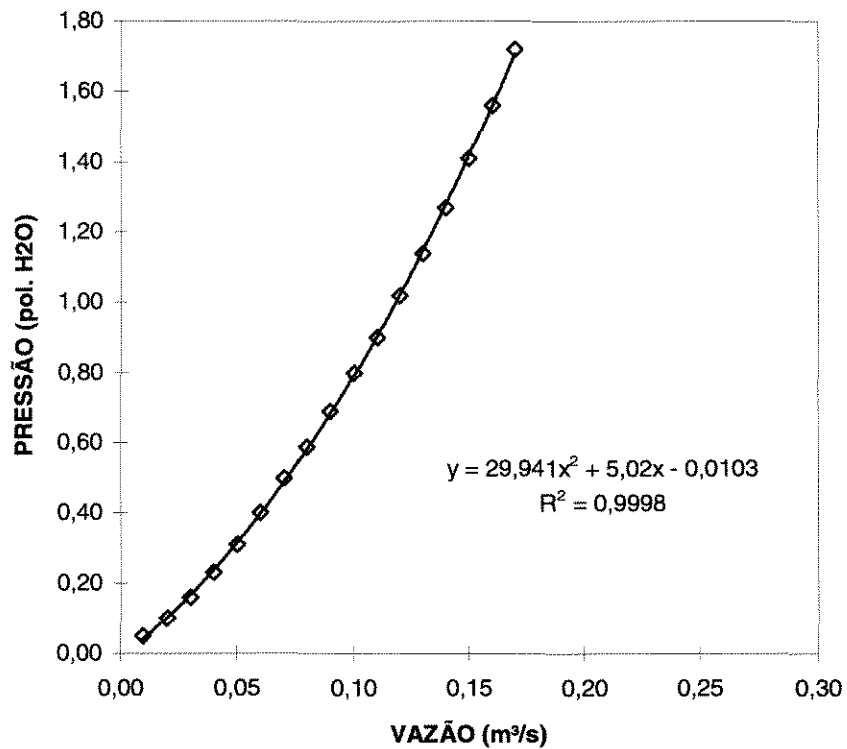
AP - 03.02. Pressão Total do Sistema (pol. H₂O) para diferentes vazões (m³/s), no percurso n°2



AP - 03.03. Pressão Total do Sistema (pol. H₂O) para diferentes vazões (m³/s), no percurso n°3



AP - 03.04. Pressão Total do Sistema (pol. H₂O) para diferentes vazões (m³/s), no percurso n°4



AP - 03.05. Pressão Total do Sistema (pol. H₂O) para diferentes vazões (m³/s), no percurso n°5

**AP-04. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES E SISTEMAS
UTILIZADOS**

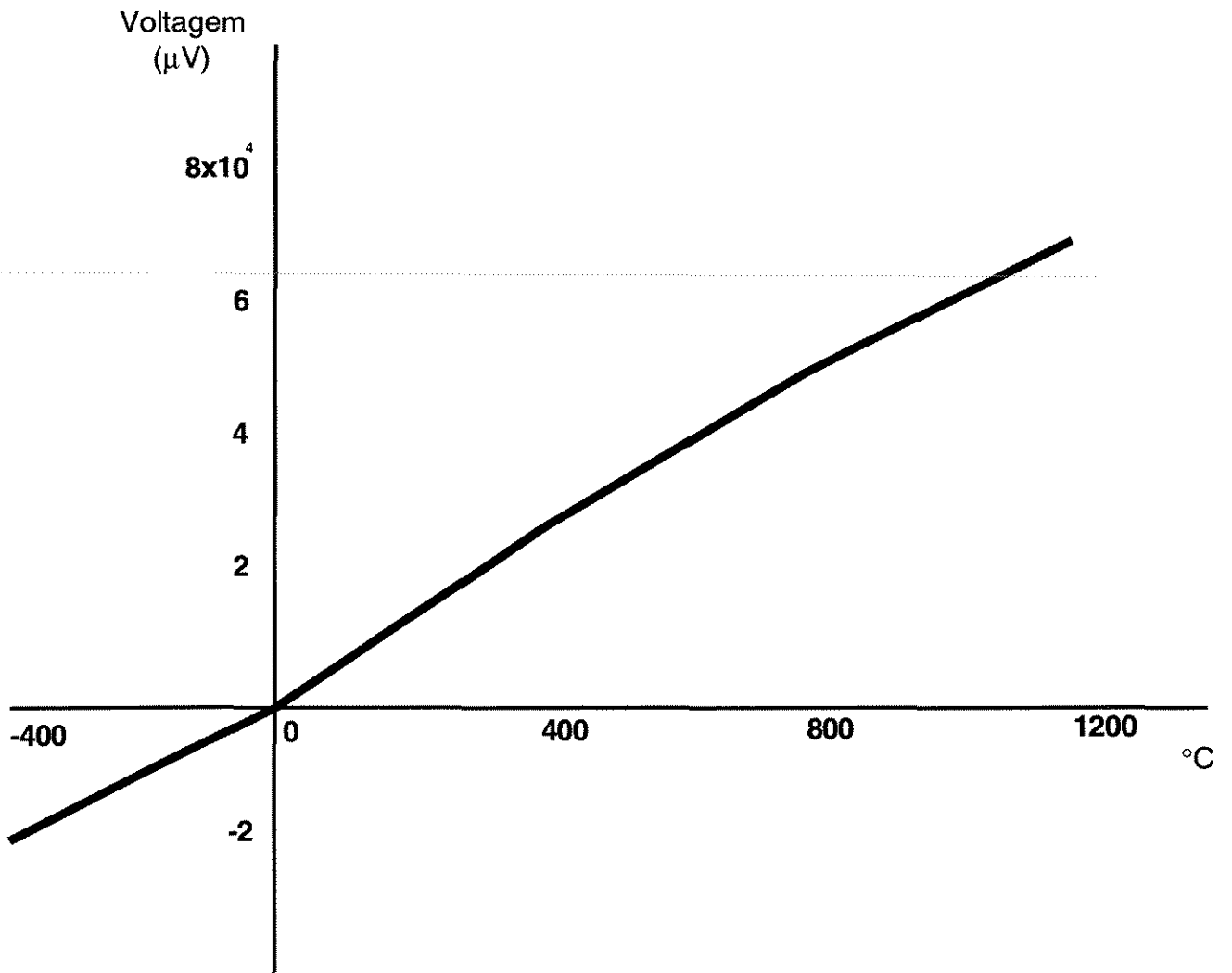


Gráfico AP - 04.01. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo J usados durante o experimento

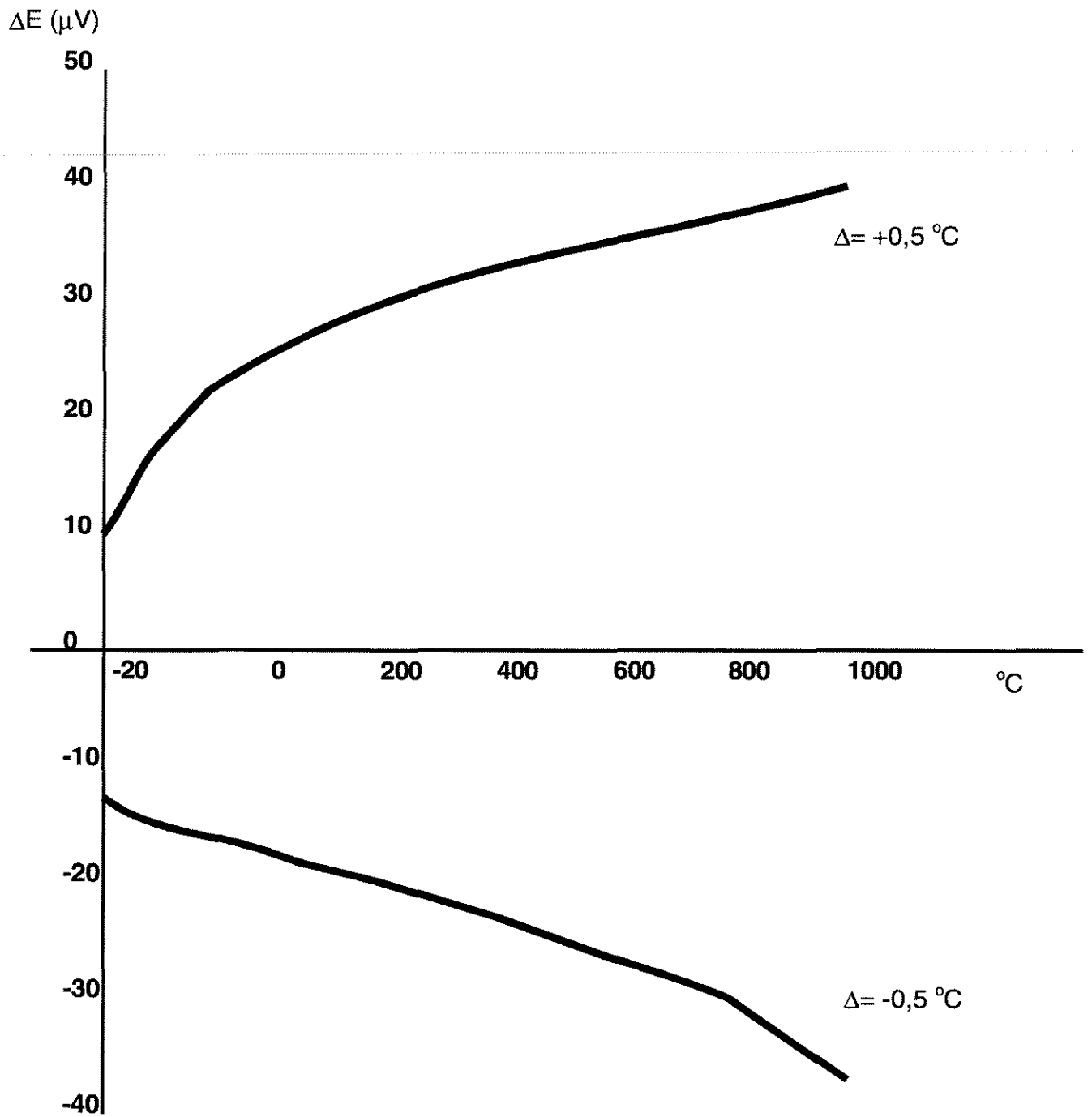


Gráfico AP - 04.02. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo J, padrão e experimental

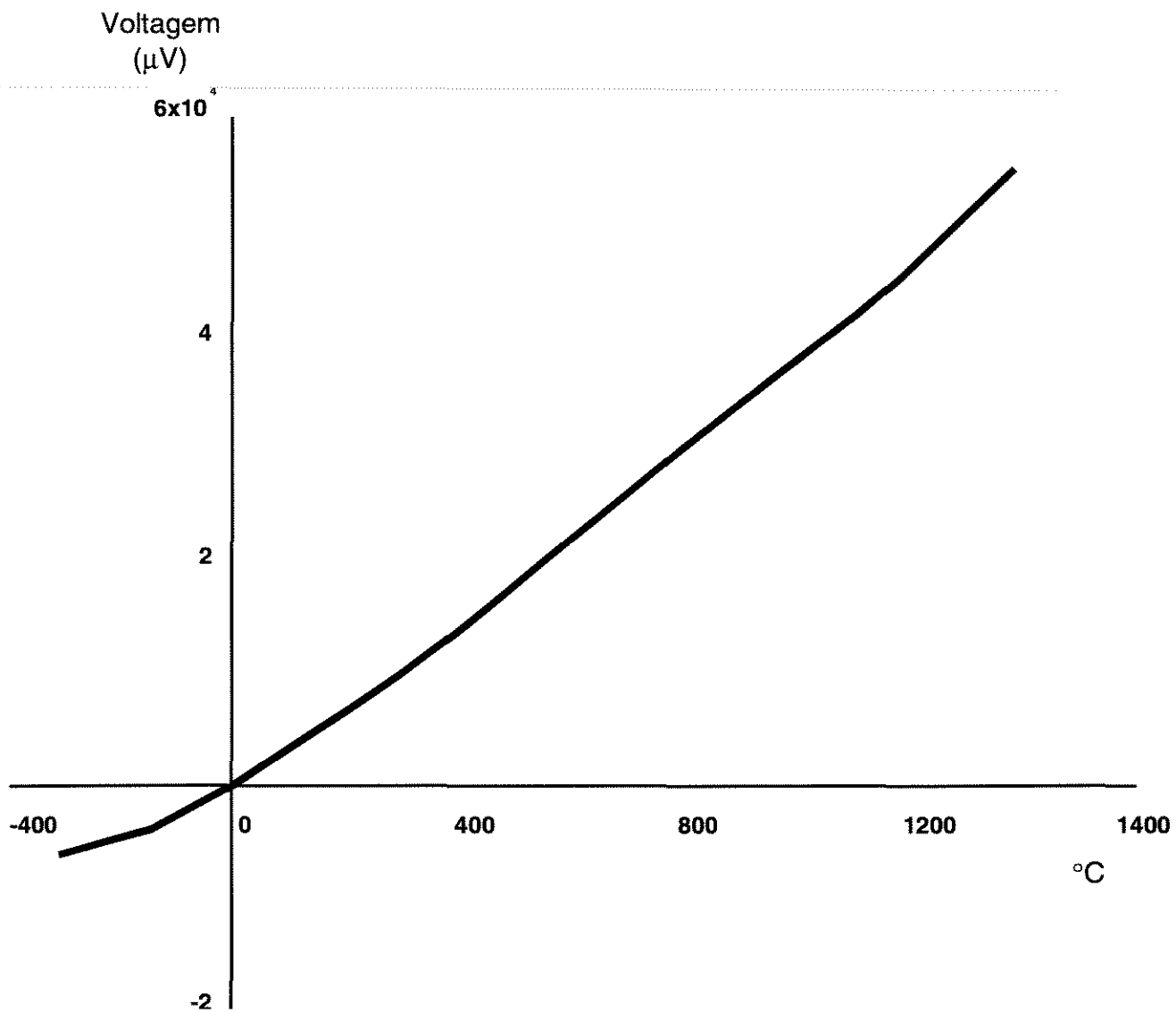


Gráfico AP - 04.03. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo K usados durante o experimento

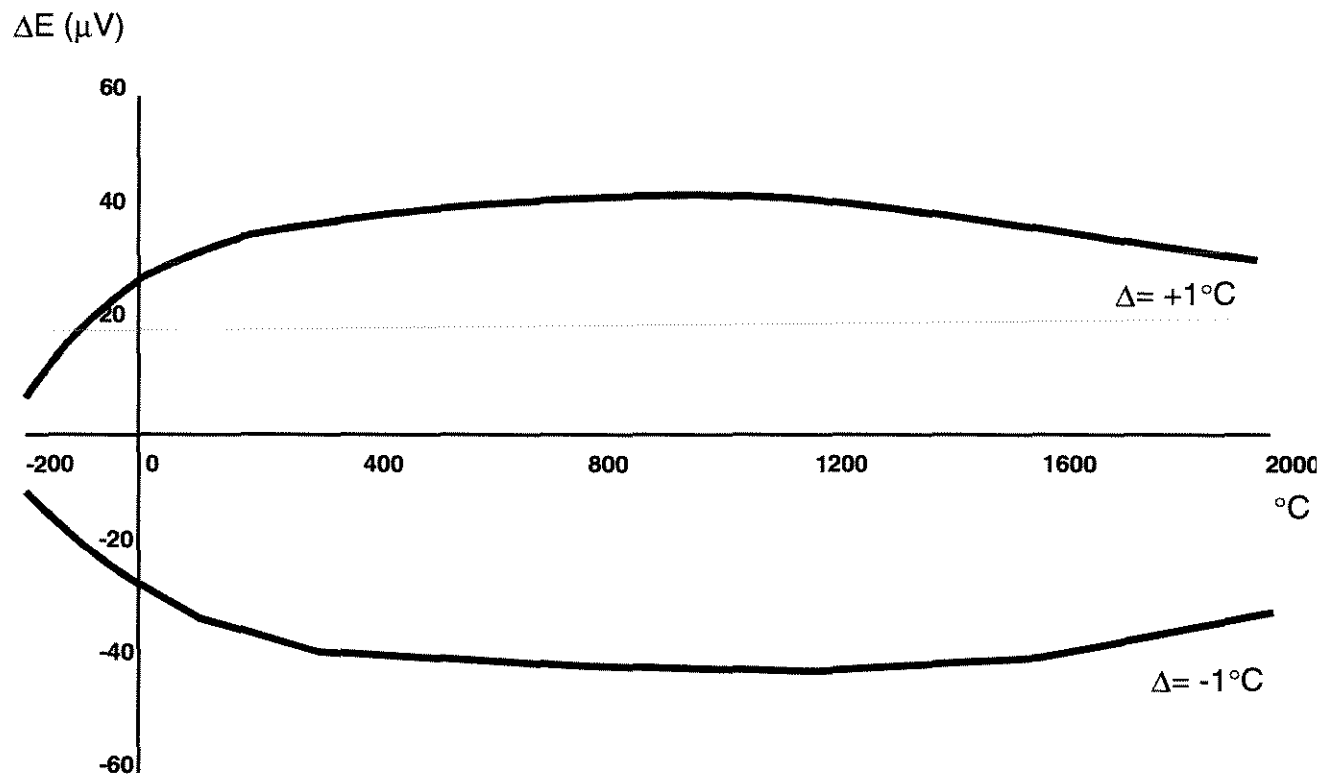


Gráfico AP - 04.04. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo K, padrão e experimental

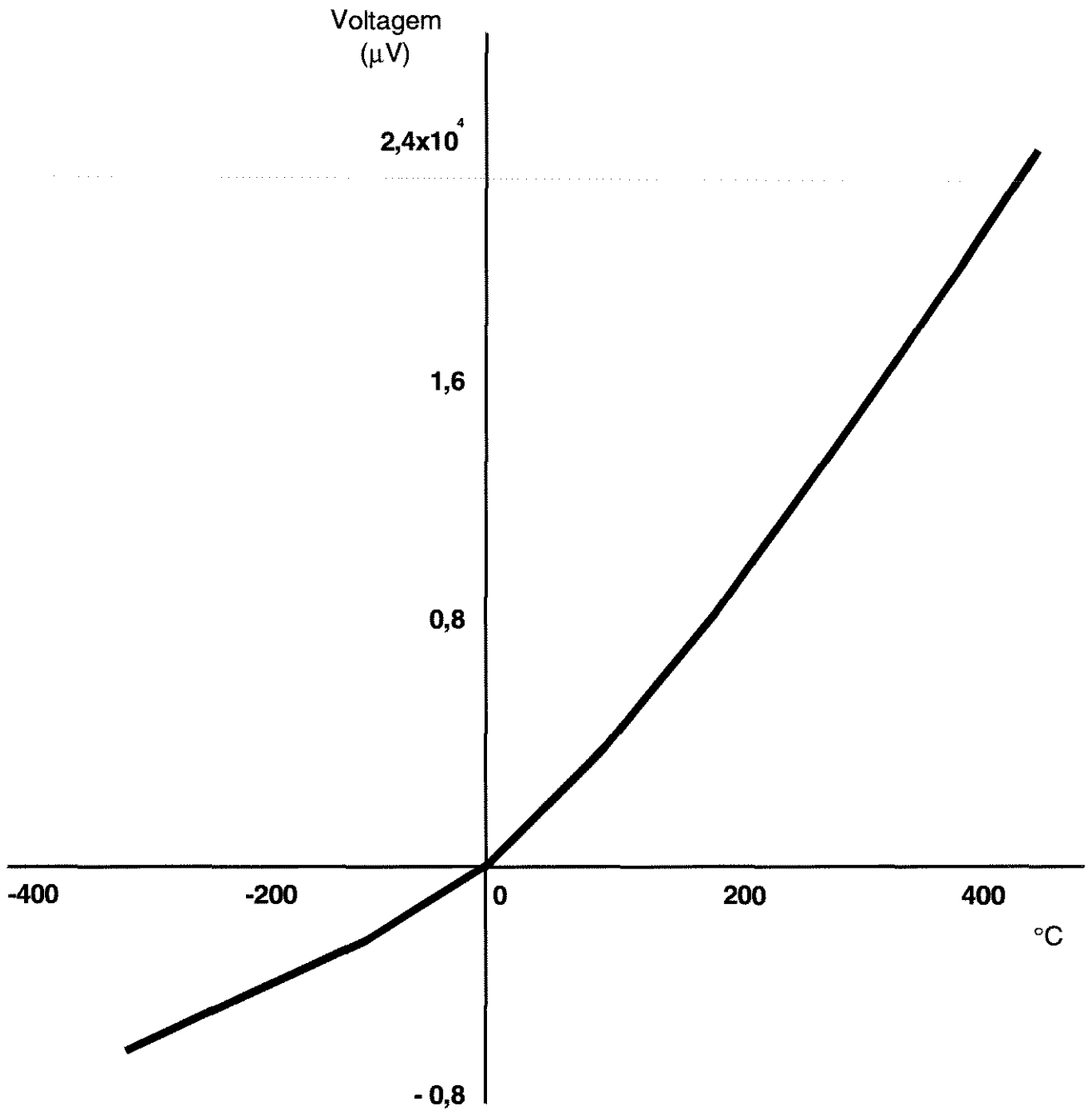


Gráfico AP - 04.05. Curva de calibração da voltagem termoelétrica para os termopares tipo T usados durante o experimento

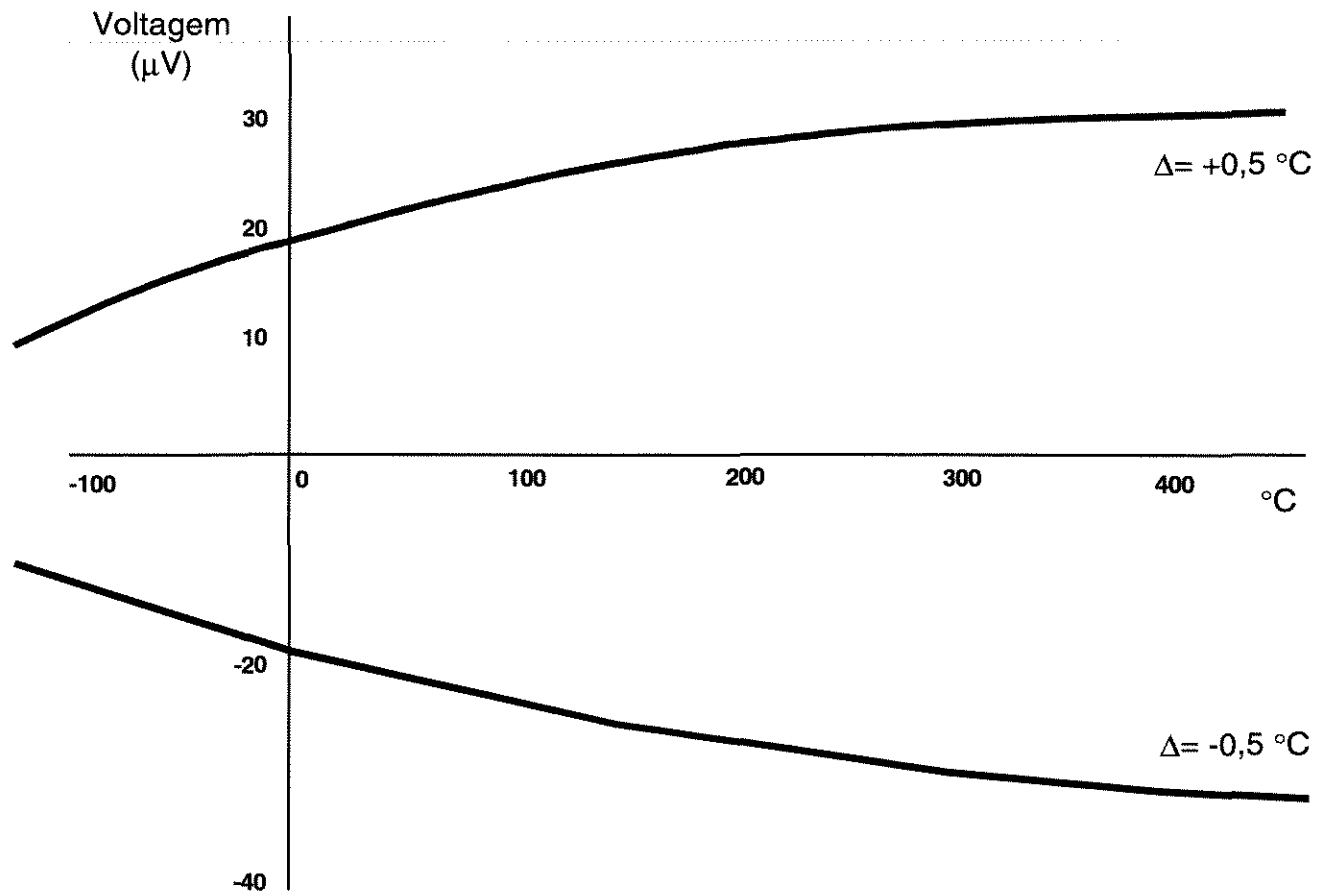


Gráfico AP - 04.06. Curva da diferença entre a voltagem termoelétrica para os termopares tipo T, padrão e experimental

AP-05. RESULTADOS GLOBAIS DAS AVALIAÇÕES ENERGÉTICAS E EXERGÉTICAS DOS DIFERENTES PROCESSOS GERADOS PELO SIGEP

ANEXOS



**AN-01.DETERMINAÇÃO DO ESTADO E PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS DAS SUBSTÂNCIAS**

A equação de estado de uma substância pura é uma relação matemática entre pressão, temperatura e volume específico, quando o sistema está em equilíbrio termodinâmico:

$$f(P, T, v) = 0$$

01

Princípios de estatística tem sido empregado para explorar as propriedades fundamentais da matéria e, para prever uma equação de estado baseada na natureza estatística de um determinado sistema ou para propor uma forma funcional para uma equação de estado na qual parâmetros desconhecidos poderiam ser determinados através de medidas das propriedades termodinâmicas de uma substância. A equação fundamental com a qual é baseada esta teoria é a equação virial.

A equação virial é expressa tanto como uma expansão na pressão P ou em valores recíprocos do volume específico (v), segundo ASHRAE - FUNDAMENTALS (1981):

$$\frac{Pv}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

02

ou

$$\frac{Pv}{RT} = 1 + \left(\frac{B}{v}\right) + \left(\frac{C}{v^2}\right) + \left(\frac{D}{v^3}\right) + \dots$$

03

onde

B', C', D' = coeficientes;

B, C, D = são coeficientes viriais.

e os coeficientes viriais são funções, somente, da temperatura e os valores dos coeficientes estão relacionados entre si, como por exemplo, $B' = B/RT$; $C' = (C - B^2)/(RT)^2$.

Sabendo-se que R é a constante universal dos gases ideais, definida como:

$$R = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{(Pv)_T}{T_{pt}}$$

04

onde

$(Pv)_T$ é o produto da pressão pelo volume específico ao longo de uma linha isotérmica e T_{pt} é a temperatura do ponto triplo da água = 273,16 K e o mais atual e correto valor para R é 8.314,34 J/kg.mol.K.

O termo Pv/RT é, também, referido como o fator de compressibilidade (Z), então:

$$Z = 1 + \left(\frac{B}{v}\right) + \left(\frac{C}{v^2}\right) + \left(\frac{D}{v^3}\right) + \dots$$

05

A vantagem da forma virial é o fato de se poder usá-la como meio de prever os coeficientes de baixa ordem e fornecer um significado físico para os coeficientes viriais. Uma vez que interações de baixa ordem são comuns e as contribuições de ordens mais altas são, sucessivamente, menores.

Segundo REYNOLDS (1979), as equações viriais para o ar, água e R-12, são, respectivamente, as seguintes:

$$P = \rho RT + \rho^2 \left(A_1 T + A_2 T^{0.5} + \sum_{i=3}^5 A_i T^{3-i} \right) + \rho^3 \sum_{i=6}^9 A_i T^{7-i} + \rho^4 \sum_{i=10}^{12} A_i T^{11-i} + \rho^5 A_{13} +$$

$$+ \rho^6 \left(\frac{A_{14}}{T} + \frac{A_{15}}{T^2} \right) + \rho^7 \frac{A_{16}}{T} + \rho^8 \left(\frac{A_{17}}{T} + \frac{A_{18}}{T^2} \right) + \rho^9 \frac{A_{19}}{T^2} +$$

$$+ e^{-\rho^2} \left[\rho^3 \left(\frac{A_{20}}{T^2} + \frac{A_{21}}{T^3} \right) + \rho^5 \left(\frac{A_{22}}{T^2} + \frac{A_{23}}{T^4} \right) + \rho^7 \left(\frac{A_{24}}{T^2} + \frac{A_{25}}{T^3} \right) + \rho^9 \left(\frac{A_{26}}{T^2} + \frac{A_{27}}{T^4} \right) + \right. \quad 06$$

$$\left. \rho^{11} \left(\frac{A_{28}}{T^2} + \frac{A_{29}}{T^3} \right) + \rho^{13} \left(\frac{A_{30}}{T^2} + \frac{A_{31}}{T^3} + \frac{A_{32}}{T^4} \right) \right]$$

onde:

M = peso molecular = 28,96 kg/kmol.
 T_c = temperatura crítica do ar = 132,50 K
 ρ_c = densidade crítica do ar = 343,3 kg/ m³
 P_c = pressão crítica do ar = 3,77 MPa
R = constante do ar seco, = 287,0686 J/kg.K

T = temperatura absoluta, K
 ρ = densidade do ar, kg/m³
P = pressão do ar, Pa
 $\gamma = 5,97105475117183 * 10^{-6}$

$A_1 = 1,55623098409137 * 10^{-1}$
 $A_2 = 1,25288666202326 * 10^1$
 $A_3 = -2,92541568638838 * 10^2$
 $A_4 = 4,29432480725523 * 10^3$
 $A_5 = -5,58450959675108 * 10^5$
 $A_6 = 3,92054480883008 * 10^{-4}$
 $A_7 = -4,40985641881347 * 10^{-2}$
 $A_8 = 5,86387178724129 * 10^{-4}$
 $A_9 = 7,97411385439405 * 10^4$
 $A_{10} = 9,88045320906742 * 10^{-9}$
 $A_{11} = 2,97999237261289 * 10^{-4}$

$A_{17} = -1,70388092279449 * 10^{-13}$
 $A_{18} = 5,91103444646786 * 10^{-11}$
 $A_{19} = -1,05363473794348 * 10^{-14}$
 $A_{20} = -7,32732651196978 * 10^4$
 $A_{21} = -5,42674649924748 * 10^5$
 $A_{22} = -4,48935466142735 * 10^{-1}$
 $A_{23} = 2,81453138446295 * 10^2$
 $A_{24} = -8,83132042791851 * 10^{-7}$
 $A_{25} = -1,32229814838386 * 10^{-5}$
 $A_{26} = -2,16521865046609 * 10^{-12}$
 $A_{27} = -1,47835008246593 * 10^{-9}$

$$\begin{aligned}
A_{12} &= -6,81783040959070 * 10^{-2} \\
A_{13} &= 2,02551630992042 * 10^{-7} \\
A_{14} &= -1,62724281849497 * 10^{-7} \\
A_{15} &= -1,06340143152999 * 10^{-4} \\
A_{16} &= 3,51428501875049 * 10^{-10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{28} &= -6,93219849301501 * 10^{-19} \\
A_{29} &= 6,06743598768355 * 10^{-17} \\
A_{30} &= -3,20538718135891 * 10^{-24} \\
A_{31} &= -4,73178337355130 * 10^{-23} \\
A_{32} &= 3,83950822306912 * 10^{-22}
\end{aligned}$$

$$P = \rho RT \left[1 + \rho Q + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad 07$$

onde

$$Q = (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{a_j})^{j-2} \left[\sum_{i=1}^8 A_{i,j} (\rho - \rho_{a_j})^{i-1} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{i,j} \rho^{i-9} \right] \quad 08$$

e

$$\tau = T_a / T \quad 09$$

M = peso molecular da água = 18,016 kg/kmol

P_c = pressão crítica da água = 22,089 Mpa

ρ_c = densidade crítica da água = 317,0 kg / m³

T₀ = temperatura ponto triplo da H₂O = 273,16 K

ρ_{a1} = 634 e ρ_{aj} = 1000 para j = 2,3,...,7

T_c = temp. crítica = 647,286K

T_a = 1000 K

E = 4,8 * 10⁻³

R = 461,51 J/kg.K

τ_{a1} = τ_c ; τ_{aj} = 2,5 , j > 1 \quad 10

$$A_{1,1} = 2,9492937 * 10^{-2}$$

$$A_{2,1} = -1,3213917 * 10^{-4}$$

$$A_{3,1} = 2,7464632 * 10^{-7}$$

$$A_{4,1} = -3,6093828 * 10^{-10}$$

$$A_{5,1} = 3,4218431 * 10^{-13}$$

$$A_{6,1} = -2,4450042 * 10^{-16}$$

$$A_{7,1} = 1,5518535 * 10^{-19}$$

$$A_{8,1} = 5,9728487 * 10^{-24}$$

$$A_{9,1} = -4,1030848 * 10^{-1}$$

$$A_{10,1} = -4,1605860 * 10^{-4}$$

$$A_{1,2} = -5,1985860 * 10^{-3}$$

$$A_{2,2} = 7,7779182 * 10^{-6}$$

$$A_{3,2} = -3,3301902 * 10^{-8}$$

$$A_{4,2} = -1,6254622 * 10^{-11}$$

$$A_{5,2} = -1,7731074 * 10^{-13}$$

$$A_{6,2} = 1,2748742 * 10^{-16}$$

$$A_{7,2} = 1,3746153 * 10^{-19}$$

$$A_{8,2} = 1,5597836 * 10^{-22}$$

$$A_{9,2} = 3,3731180 * 10^{-1}$$

$$A_{9,3} = -1,3746618 * 10^{-1}$$

$$A_{10,3} = -7,3396848 * 10^{-4}$$

$$A_{1,4} = -1,5641040 * 10^{-4}$$

$$A_{2,4} = -7,2546108 * 10^{-7}$$

$$A_{3,4} = -9,2734289 * 10^{-9}$$

$$A_{4,4} = 4,3125840 * 10^{-12}$$

$$A_{9,4} = 6,7874983 * 10^{-3}$$

$$A_{10,4} = 1,0401717 * 10^{-5}$$

$$A_{1,5} = -6,3972405 * 10^{-3}$$

$$A_{2,5} = 2,6409282 * 10^{-5}$$

$$A_{3,5} = -4,7740374 * 10^{-8}$$

$$A_{4,5} = 5,6323130 * 10^{-11}$$

$$A_{9,5} = 1,3687317 * 10^{-1}$$

$$A_{10,5} = 6,4581880 * 10^{-4}$$

$$A_{1,6} = -3,9661401 * 10^{-3}$$

$$A_{2,6} = 1,5453061 * 10^{-5}$$

$$A_{3,6} = -2,9142470 * 10^{-8}$$

$$A_{4,6} = 2,9568796 * 10^{-11}$$

$$A_{9,6} = 7,9847970 * 10^{-2}$$

$$\begin{aligned}
A_{10,2} &= -2,0988866 * 10^{-4} & A_{10,6} &= 3,9917570 * 10^{-4} \\
A_{1,3} &= 6,8335354 * 10^{-3} & A_{1,7} &= -6,9048554 * 10^{-4} \\
A_{2,3} &= -2,6149751 * 10^{-5} & A_{2,7} &= 2,7407416 * 10^{-6} \\
A_{3,3} &= 6,5326396 * 10^{-8} & A_{3,7} &= -5,1028070 * 10^{-9} \\
A_{4,3} &= -2,6181978 * 10^{-11} & A_{4,7} &= 3,9636085 * 10^{-12} \\
A_{5,3}=A_{6,3}=A_{7,3}=A_{8,3}=A_{5,4}=A_{6,4}=A_{7,4}=A_{8,4} &= 0 & A_{9,7} &= 1,3041253 * 10^{-2} \\
A_{5,5}=A_{6,5}=A_{7,5}=A_{8,5}=A_{5,6}=A_{6,6}=A_{7,6}=A_{8,6} &= 0 & A_{10,7} &= 7,1531353 * 10^{-5} \\
A_{5,7}=A_{6,7}=A_{7,7}=A_{8,7} &= 0 & &
\end{aligned}$$

$$P = \frac{RT}{v-b} + \sum_{i=2}^5 \frac{1}{(v-b)^i} \left(A_i + B_i T + C_i e^{-kT/T_c} \right) \quad 11$$

onde

$$\begin{aligned}
M &= \text{peso molecular do R-12} = 120,93 \text{ kg / kmol} & R &= 68,7480 \text{ J / kg.K} \\
T_0 &= \text{temperatura padrão do R-12} = 200 \text{ K} & T_c &= \text{temp. crítica} = 385,17 \text{ K} \\
P_c &= \text{pressão crítica do R-12} = 4,1159 \text{ Mpa} & b &= 4,06366926 * 10^{-4} \\
\rho_c &= \text{densidade crítica do R-12} = 588,08 \text{ kg/m}^3 & k &= 5,475
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= -9,16210126 * 10^{-1} & B_5 &= 4,08193371 * 10^{-11} \\
A_3 &= 1,01049598 * 10^{-1} & C_2 &= -1,52524293 * 10^{-3} \\
A_4 &= -5,74040225 * 10^{-5} & C_3 &= 2,19982681 * 10^0 \\
B_2 &= 7,71136428 * 10^{-2} & C_5 &= -1,66307226 * 10^{-7} \\
B_3 &= -5,67539138 * 10^{-5} & A_5 = B_4 = C_4 &= 0
\end{aligned}$$

Para as condições de pressão de saturação do ar, da água e do refrigerante R-12, REYNOLDS (1979) definiu as seguintes equações e parâmetros, respectivamente:

$$\ln\left(\frac{P}{P_c}\right) = F_1 X + F_2 X^2 + F_3 \ln\left(\frac{T}{T_c}\right) \quad 12$$

onde

$$X = \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} \right) \quad 13$$

onde, para a linha de ponto de orvalho, tem-se:

$$\begin{aligned}
P_c &= \text{pressão crítica do ar} = 3,77436 * 10^6 \text{ Pa} & F_1 &= 8,52176441 * 10^{-1} \\
T_c &= \text{temperatura crítica do ar} = 132,50 \text{ K} & F_2 &= -2,66657734 * 10^{-4}
\end{aligned}$$

$$F_3 = 5,46923993 * 10^0$$

e, para ao longo da linha de “bolhas”, tem-se:

$$P_c = 3,77436 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$F_2 = 4,40210939 * 10^{-4}$$

$$F_1 = 1,69881524 * 10^3$$

$$F_3 = -7,61593848 * 10^0$$

$$\ln\left(\frac{P}{P_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T} - 1\right) \sum_{i=1}^8 F_i [a(T - T_p)]^{i-1} \quad 14$$

onde

$$a = 0,01$$

$$T_c = 647,286 \text{ K}$$

$$F_1 = -7,4192420 * 10^0$$

$$F_3 = -1,1552860 * 10^{-1}$$

$$F_5 = 1.0940980 * 10^{-3}$$

$$F_7 = 2,5206580 * 10^{-3}$$

$$P_c = 22,089 \text{ Mpa}$$

$$T_p = 338,15 \text{ K}$$

$$F_2 = 2,9721000 * 10^{-1}$$

$$F_4 = 8,6856350 * 10^{-3}$$

$$F_6 = -4,3999300 * 10^{-3}$$

$$F_8 = -5,2186840 * 10^{-4}$$

$$\ln P = F_1 + \frac{F_2}{T} + F_3 \ln T + F_4 T \quad 15$$

onde

$$F_1 = 9,33438056 * 10^1$$

$$F_3 = -1,2475223 * 10^1$$

$$F_2 = -4,39618785 * 10^3$$

$$F_4 = 1,96060432 * 10^{-2}$$

Com relação as equações de densidade, para as condições de líquido saturado, REYNOLDS (1979), definiu as equações abaixo e respectivos parâmetros para o ar, água e R-12, respectivamente, da seguinte maneira:

$$\rho_f = \sum_{i=1}^6 D_i X^{(i-1)/3} \quad 16$$

onde

$$X = 1 - \frac{T}{T_c} \quad 17$$

e, ao longo da linha de “bolhas”, tem-se que,

$$\begin{aligned} T_c &= 132,5 \text{ K} & D_1 &= 3,4330000 * 10^{-2} \\ D_2 &= 3,0180940 * 10^{-2} & D_3 &= 4,9645720 * 10^{-2} \\ D_4 &= 5,0111300 * 10^{-2} & D_5 &= -5,4461730 * 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\rho_f = \rho_c \left[1 + \sum_{i=1}^N D_i (X)^{i/3} \right] \quad 18$$

onde

$$\begin{aligned} \rho_c &= \text{densidade crítica da água} = 317,0 \text{ kg/m}^3 & T_c &= \text{temp. crítica da água} = 647,286 \text{ K} \\ D_1 &= 3,6711257 & D_2 &= -2,8512396 * 10^{-1} \\ D_3 &= 2,2265240 * 10^{-2} & D_4 &= -8,8243852 * 10^{-2} \\ D_5 &= 2,0002765 * 10^{-3} & D_6 &= -2,6122557 * 10^{-3} \\ D_7 &= 1,8297674 * 10^{-3} & D_8 &= -5,3350520 * 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\rho_f = \sum_{i=1}^5 D_i X^{(i-1)/3} + D_6 X^{0,5} + D_7 X^2 \quad 19$$

onde

$$\begin{aligned} T_c &= \text{temp. crítica do R-12} = 388,17 \text{ K} & D_1 &= 5,58084540 * 10^{-2} \\ D_2 &= 8,544458040 * 10^{-2} & D_3 &= 0,00 \\ D_4 &= 2,994077103 * 10^{-2} & D_5 &= 0,00 \\ D_6 &= 3,521500633 * 10^{-2} & D_7 &= -5,047419739 * 10^{-1} \end{aligned}$$

Finalmente, para a determinação do calor específico (J/kg.K), REYNOLDS (1979), desenvolveu as equações e determinou os parâmetros abaixo, onde para o ar, excepcionalmente, é calculado para o ar seco (c_{pa}) e para o vapor de água (c_{pv}) através de uma equação polinomial cúbica, utilizando-se dados tabulados da fonte acima; então, para o ar, a água e para o R-12, tem-se, respectivamente, que:

$$C_{pa} = \sum_{i=1}^4 C_i T^{i-1}$$

20

onde

$$C_1 = 0,924657736 * 10^0$$

$$C_2 = 0,000823497 * 10^0$$

$$C_3 = -0,000002877 * 10^0$$

$$C_4 = 0,000000003 * 10^0$$

$$C_{pv} = \sum_{i=1}^6 G_i T^{i-2}$$

21

onde

$$G_1 = 4,6000000 * 10^4$$

$$G_2 = 1,0112490 * 10^3$$

$$G_3 = 8,3893000 * 10^{-1}$$

$$G_4 = -2,1998900 * 10^{-4}$$

$$G_5 = 2,4661900 * 10^{-7}$$

$$G_6 = -9,7047000 * 10^{-11}$$

$$u_0 = 2,37502070 * 10^6$$

$$s_0 = 6,6965776 * 10^3$$

$$C_{pv} = \sum_{i=1}^4 G_i T^{i-1}$$

22

onde

$$G_1 = 3,389005260 * 10^1$$

$$G_2 = 2,507020671 * 10^0$$

$$G_3 = -3,274505926 * 10^{-3}$$

$$G_4 = 1,641736815 * 10^{-6}$$

$$u_0 = 1,697018700 * 10^6$$

$$s_0 = 8,944876400 * 10^3$$

AN-02. CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

AN-2.1 CÁLCULO DA ENTROPIA

Da equação de GIBBS, segundo ASHRAE-FUNDAMENTALS (1981), tem-se que a entropia pode ser calculada por:

$$ds = \frac{1}{T} du + \frac{P}{T} dv \quad \dots \dots \dots \quad 01$$

e

$$ds = \frac{1}{T} dh - \frac{v}{T} dP \quad \dots \dots \dots \quad 02$$

Os diferenciais de entropia podem, ainda, ser calculados, primeiro, ao longo de linhas isotérmicas usando dados de P-v-T e das relações de MAXWELL:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \quad \dots \dots \dots \quad 03$$

ou

$$\int_{T, s_1}^{s_2} ds = - \int_{T, P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP \quad \dots \dots \dots \quad 04$$

e

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \quad \dots \dots \dots \quad 05$$

ou

$$\int_{T, s_1}^{s_2} ds = \int_{T, v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv \quad \dots \dots \dots \quad 06$$

e, segundo, através de dados de capacidade calorífica, isto é:

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P \quad 07$$

e

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad 08$$

Entretanto, como $dh = T ds + v dP$ e a pressão constante $dP = 0$, então:

$$c_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P \quad 09$$

e

$$\int_{P, s_1}^{s_2} ds = \int_{P, T_1}^{T_2} \left(\frac{c_p}{T} \right) dT \quad 10$$

Similarmente, com $c_v \equiv (\partial u / \partial T)$ e $du = T ds - P dv$, tem-se que:

$$c_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \quad 11$$

e

$$\int_{v, s_1}^{s_2} ds = \int_{v, T_1}^{T_2} \left(\frac{c_v}{T} \right) dT \quad 12$$

Portanto, valores de entropia ao longo de linhas isobáricas e isométricas podem, então, serem obtidas de dados de c_p ou c_v .

AN-2.2 CÁLCULO DE ENERGIA INTERNA E ENTALPIA.

Os cálculos de energia interna e entalpia empregam as equações (01) e (02), usando funções entrópicas apresentadas anteriormente e, juntamente, com funções que definem as capacidades caloríficas [$c_p \equiv (\partial h / \partial T)_P$ e $c_v \equiv (\partial u / \partial v)_T$] e a equação de Clapeyron:

$$\left(\frac{dP}{dT} \right) = \frac{(h_g - h_f)}{T(v_g - v_f)} \quad 13$$

e, da equação (01) ao longo de uma linha isotérmica

$$\int_{T \ s_1}^{s_2} ds \quad 14$$

que pode ser estimada através das equações (03) e (04), com $T = \text{constante}$. O problema remanescente para a variação isotérmica da energia interna (u) é o cálculo de :

$$\int_{T \ v_1}^{v_2} P dv \quad 15$$

ao longo da isotérmica. Se a equação de estado é da forma $P = P(T, v)$, este cálculo é relativamente simples. Isto, sugere que a equação para variação de energia interna ao longo de uma isotérmica, seria :

$$(u_2 - u_1)_T = \int_{T \ v_1}^{v_2} \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv \quad 16$$

Entalpia, pode, então, ser calculada, através de $h = u + P v$, isto é:

$$(h_2 - h_1)_T = \int_{T \ v_1}^{v_2} \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv + P_2 v_2 - P_1 v_1 \quad 17$$

Um método alternativo de cálculo das diferenças de energia interna e de entalpia ao longo de uma isotérmica é através da equação (02) , como $dh = T ds + v dP$, então:

$$(h_2 - h_1)_T = \int_{P_1}^{P_2} \left[-T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P + v \right] dP \quad 18$$

e

$$(u_2 - u_1)_T = \int_{P_1}^{P_2} \left[-T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P + v \right] dP - P_2 v_2 + P_1 v_1 \quad 19$$

Equações (16) e (17) podem ser estendidas para as mudanças de energia interna e entalpia, ao longo de qualquer combinação de caminhos de isotérmicas, isobáricas e isométricas, combinadas com as relações de capacidades caloríficas.

Por exemplo, da equação (16) combinada com a variação de energia interna, ao longo de uma linha de volume específico constante, tem-se :

$$du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv \quad 20$$

e da equação (18), combinada com a variação de entalpia, ao longo de uma linha de pressão constante, obtém-se :

$$dh = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad 21$$