

Referências Bibliográficas

- 1 Environment and Sustainable Development Division (ESDD), **Guidebook on Cogeneration as a Means of Pollution Control and Energy Efficiency in Asia**, 2000. Disponível em <[http:// www.unescap.org/publications](http://www.unescap.org/publications)>. Acesso em: dezembro. 2006.
- 2 d'Accadia, M. D. et al. **Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications**. Itália, 2003.
- 3 Onovwiona, H. I. e Ugursal, V. I., **Residential cogeneration systems: review of the current technology**. Canadá, 2004.
- 4 Paro, A. C., **Estudo da contribuição do gás natural no setor elétrico – uma análise de cenários de sua expansão nos setores de geração termelétrica, cogeração e residencial**: Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- 5 U.S. Environmental Protection Agency (EPA). **Environmental Technology Verification Report: Combined Heat and Power at a Commercial Supermarket – Capstone 60 kW Microturbine CHP System**, Washington, DC, 2003.
- 6 U.S. Environmental Protection Agency (EPA). **Test and Quality Assurance Plan: Combined Heat and Power at a Commercial Supermarket – Capstone 60 kW Microturbine CHP System**, Washington, DC, 2002.
- 7 do Val, L. G., **Análise Crítica do Desempenho de Plantas de Cogeração**: Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.
- 8 Huamaní, M. M., **Geração de Perfis Elétrico e Térmico para Otimização de um Sistema de Cogeração**: Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

- 9 The McGraw-Hill Companies. **Digital Engineering Library @ McGraw-Hill**, 2004. Disponível em <[http:// www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com)>. Acesso em: março. 2006.
- 10 Pruzaesky, F. C., **Análise de um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor**: Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2005.
- 11 Orlando, A. F. e do Val, L. G., **Relatório 3**: Dados parciais de desempenho e instalação da cogeração. Rio de Janeiro, 2005.
- 12 Enedis Energía Distribuída: **Intercambiador de Calor ITC1 - manual instructivo**.
- 13 Assunção, A. S., **Procedimento Experimental para Avaliação Metro-lógica do Desempenho de uma Microturbina utilizada para Geração de Energia Elétrica**: Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- 14 Potter, M. C. e Somerton, C. W, **Schaum's outline of theory and problems of engineering thermodynamics**. McGraw-Hill, 1993.
- 15 Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E. e Borgnakke, C., **Fundamentos da Termodinâmica**. 6ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2003.
- 16 Energy Nexus Group. **Technology characterization**: Microturbines. EUA: Environmental Protection Agency, 2002.
- 17 Energy Nexus Group. **Technology characterization**: Gas Turbines. EUA: Environmental Protection Agency, 2002.
- 18 Özisik, M. N., **Transferência de Calor – Um Texto Básico**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1990.
- 19 Incropera, F. P. e DeWitt, D. P., **Introduction to heat transfer**. John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- 20 Holman, J. P., **Experimental methods for engineers**, McGraw-Hill, Inc., 1978.

- 21 Fox, R. W. e McDonald, A. T., **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.
- 22 Boyce, W. E. e DiPrima, R. C., **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- 23 Shampine, L. F., Allen, R. C. e Pruess, S. **Fundamentals of numerical computing**. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- 24 Orlando, A. F., do Val, L. G. e Huamaní, M. M., **Relatório 4: Desempenho parcial e critérios da avaliação**. Rio de Janeiro, 2005.
- 25 Capstone Turbine Corporation, **Technical Reference, Grid Connect Operation – Capstone Model C30 and C60**: 410027-001 Rev. C. Junho, 2004.
- 26 Capstone Turbine Corporation. **Technical Reference, Capstone Model C30 Electrical**: 410000-001 Rev G. Abril, 2004.
- 27 Capstone Turbine Corporation. **Technical Reference, Capstone Model C30 Performance**: 410004-001 Rev C. Fevereiro, 2004.
- 28 U.S. Environmental Protection Agency (EPA). **Greenhouse Gas (GHG) Verification Guidelines Series**: Natural Gas-Fired Microturbine Electrical Generators, Washington, DC, 2002.
- 29 testo Inc. **Short Operation Instruction Manual (testo 350 M/XL)**: Rev. 11/03 Instrument Software Version 1.30. Disponível em <<http://www.testo.com>>. Acesso em: março. 2006.
- 30 Assunção, A. S. e Orlando, A. F. **A procedure for commissioning a microturbine electric energy generating power plant**. Rio de Janeiro, 2004.
- 31 ISO GUM. **Guia para a expressão da Incerteza de Medição, INMETRO**, 1995.
- 32 Capstone Turbine Corporation, **Capstone Microturbine Model 330 System Operation**: Março, 2001.

- 33 Macintyre, A. J., **Instalações hidráulicas**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- 34 American Society for Mechanical Engineers. **ASME-PTC–22, 1997: Performance Test Code for Gas Turbines**, PTC – 22 Code.
- 35 Rohsenow, W. M. e Hartnett, J. P., **Handbook of heat transfer.**, EUA: McGraw-Hill, Inc., 1973.
- 36 U.S. Environmental Protection Agency (EPA). **Environmental Technology Verification Report: Mariah Energy Corporation Heat PlusPower™ System**, Washington, DC, 2001.
- 37 Jui, S. H., **Engineering Thermodynamics**. New Jersey: Prentice Hall, Inc,1993.
- 38 Burghardt, M. D., **Engineering thermodynamics with applications**. New York, 1978.

Apêndice 1

FI 1/2

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA COGERAÇÃO NO HORÁRIO DE PONTA - 2004

(1) Horário de ponta (HP) - Fornecimento LIGHT

Horário	De 17:30 h às 20:30 h	
Dias	Úteis	
Número de horas mensais	h/mês	65
Tarifa de consumo energia plus	R\$/kWh	0,3857

(2) Horário fora de ponta (FHP) - Fornecimento LIGHT

Horário	Complementar	
Número de horas mensais	h/mês	665
Tarifa de consumo	R\$/kWh	0,1464

(3) Gás natural - Fornecido CEG

Poder Calorífico Inferior	kJ/Nm ³	35730
Tarifa para cogeração	R\$/Nm ³	0,84

(4) Geração de Energia Elétrica com a Microturbina CAPSTONE C30 (a 25 °C) no

horário de ponta (HP)

Potência da Microturbina	kW	27,4
Eficiência da Microturbina (Em relação ao PCI)	%	24,9
Consumo de gás natural pela Microturbina	Nm ³ /h	11,09
Consumo Específico de gás natural	Nm ³ /kWh	0,405
Custo da energia elétrica gerada	R\$/kWh	0,340
Geração de energia elétrica no horário de ponta	kWh/mês	1781,000

(5) Cogeração com a Microturbina (água quente) no horário de ponta (HP)

Temperatura de saída dos gases da Microturbina	°C	275
Temperatura de saída dos gases da Caldeira	°C	120
Disponibilidade de potência térmica da exaustão	kW	49,225
Disponibilidade de energia térmica da exaustão	kWh/mês	3199,619
Temperatura da água aquecida em cogeração	°C	85
Disponibilidade de água aquecida de 25 a 85 °C	l/mês	45853

(6) Consumo de energia elétrica pelos chuveiros no ginásio (HP e FHP)

Potência de cada chuveiro elétrico	kW	3,200
Número de chuveiros elétricos		10
Duração de um banho	min	10
Consumo de energia elétrica por banho	kWh/ba.	0,5333
Número de banhos por turno		20
Consumo de energia elétrica por turno	kWh/turno	10,667
Número de turnos por semana, HP		5
Número de turnos por semana, FHP		12
Consumo de energia elétrica pelos chuveiros, HP	kWh/mês	231,111
Consumo de energia elétrica pelos chuveiros, FHP	kWh/mês	554,667

Apêndice 1 - FI 2/2

(7) Situação 1 : Fornecimento pela LIGHT de energia elétrica para a PUC-Rio e água quente dos chuveiros elétricos

Energia elétrica fornecida, HP	kWh/mês	1781,000
Consumo de energia elétrica pelos chuveiros, HP	kWh/mês	231,111
Consumo de energia elétrica pelos chuveiros, FHP	kWh/mês	554,667
Custo da energia elétrica fornecida, HP	R\$/mês	686,96
Custo da energia elétrica consumida pelos chuveiros, HP	R\$/mês	89,14
Custo da energia elétrica consumida pelos chuveiros, FHP	R\$/mês	81,20
Custo total do fornecimento pela LIGHT de energia elétrica e água quente	R\$/mês	857,30

(8) Alternativa 1 : Geração de energia elétrica pela Microturbina e água quente nos chuveiros em cogeração

Energia elétrica gerada, HP	kWh/mês	1781,000
Água quente para banho nos chuveiros pela cogeração, HP	kWh/mês	785,778
Custo do gás natural consumido pela Microturbina, HP	R\$/mês	605,36
Economia	R\$/mês	251,93

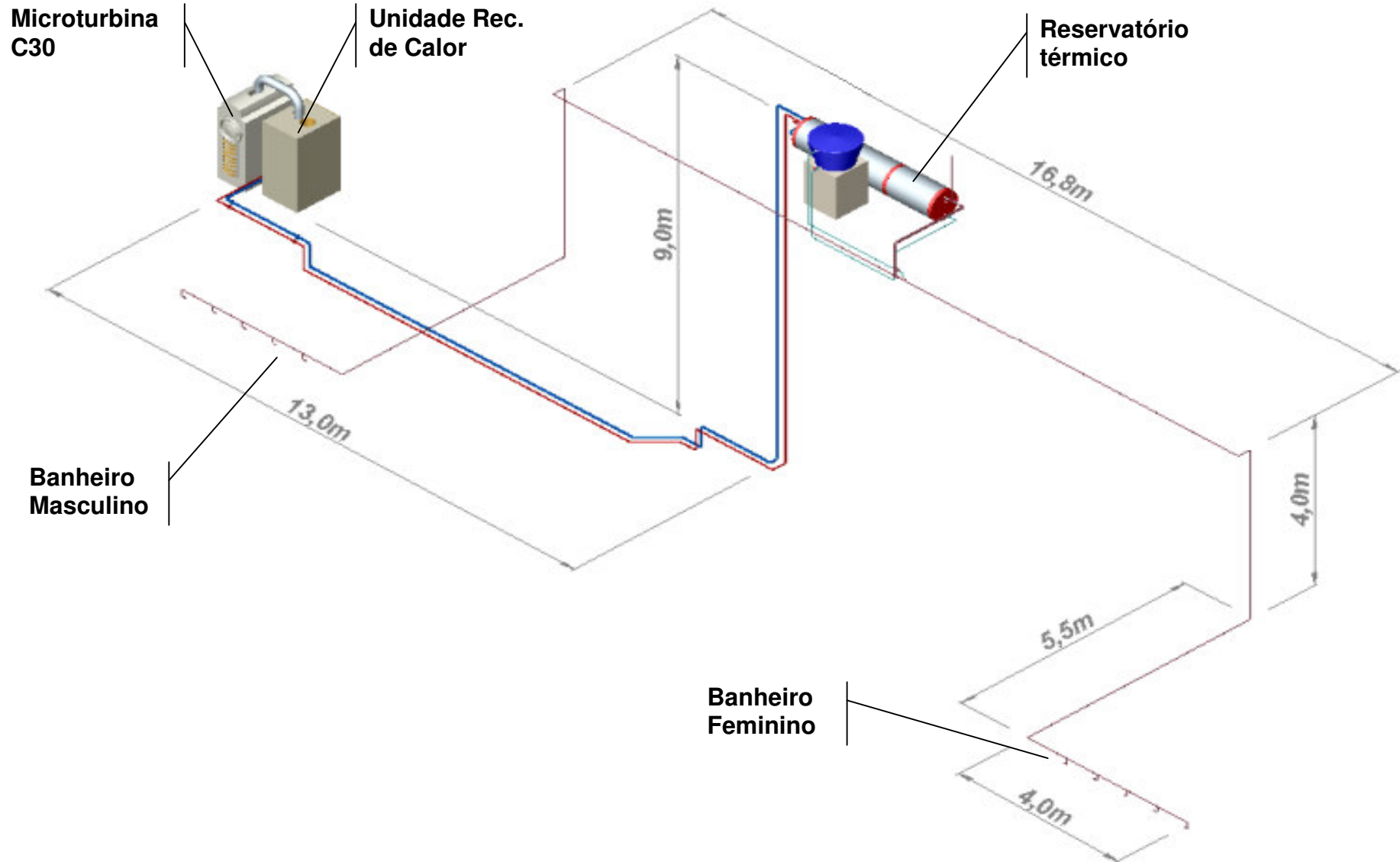
(9) Situação 2: Fornecimento pela LIGHT de energia el. para a PUC-Rio e água quente para banho, lavanderia e restaurante

Energia elétrica fornecida, HP	kWh/mês	1781,000
Consumo de energia elétrica para água quente, FHP	kWh/mês	3199,619
Custo da energia elétrica fornecida, HP	R\$/mês	686,96
Custo da energia elétrica consumida para água quente, FHP	R\$/mês	468,38
Custo total do fornecimento pela LIGHT de energia elétrica e água quente	R\$/mês	1155,34

(10) Alternativa 2 : Geração de energia el. pela Microturbina e água quente para banho, lavanderia e restaurante em cogeração

Energia elétrica gerada, HP	kWh/mês	1781,000
Água quente para banho, lavanderia e restaurante pela cogeração, HP	kWh/mês	3199,619
Custo do gás natural consumido pela Microturbina, HP	R\$/mês	605,36
Economia	R\$/mês	549,97

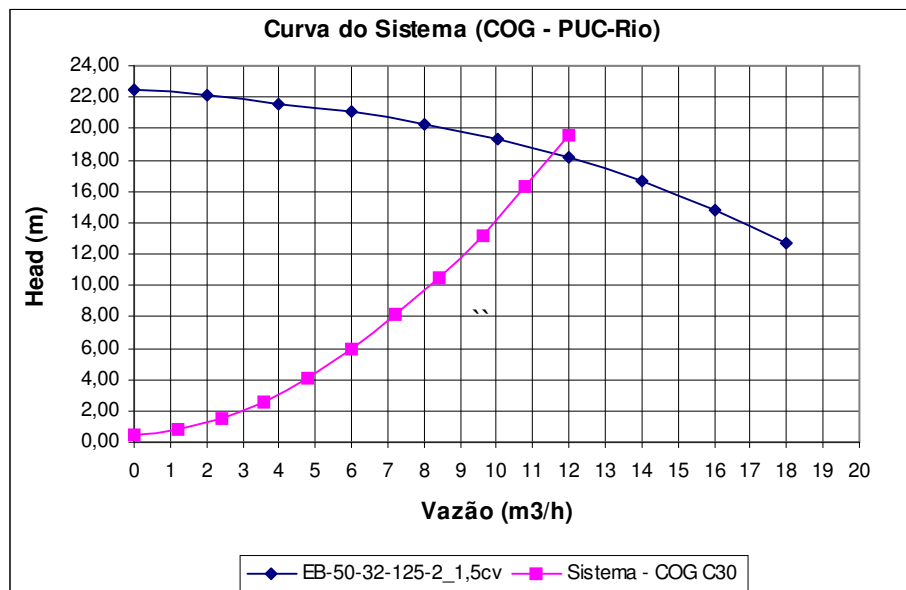
Apêndice 2 Isométrico do Sistema de Cogeração – PUC-Rio



Apêndice 3

Curva do Sistema

Bomba		Sistema			
Vazão	H _{Bomba}	Vazão			H _{SIST}
m ³ /h	m	l/min	m ³ /s	m ³ /h	m
0	22,484	0	0,000000	0,00	0,500
2	22,181	20	0,000333	1,20	0,795
4	21,606	40	0,000667	2,40	1,549
6	21,060	60	0,001000	3,60	2,580
8	20,303	80	0,001333	4,80	4,111
10	19,363	100	0,001667	6,00	5,893
12	18,181	120	0,002000	7,20	8,206
14	16,696	140	0,002333	8,40	10,430
16	14,848	160	0,002667	9,60	13,149
18	12,727	180	0,003000	10,80	16,275
		200	0,003333	12,00	19,551

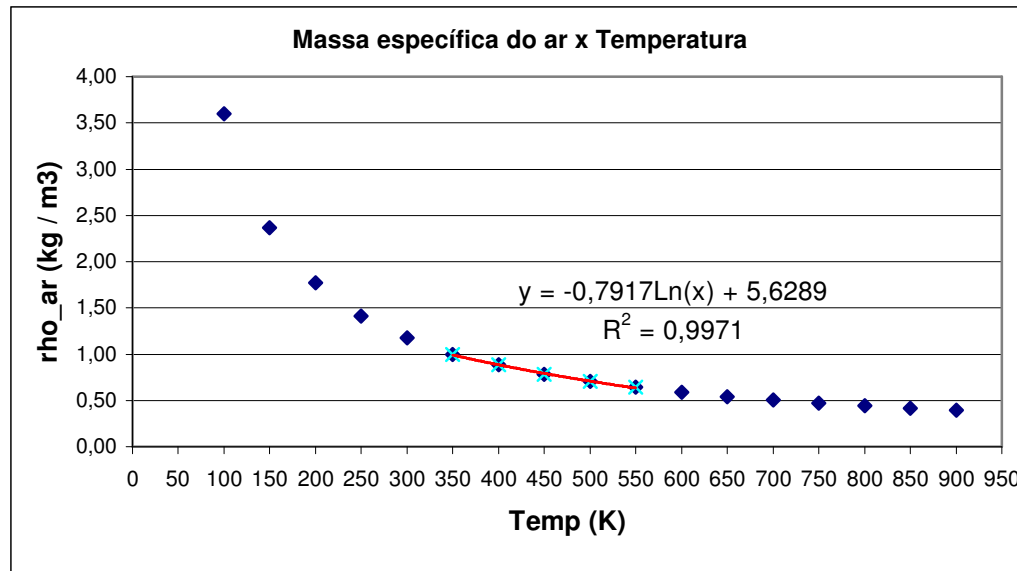


Apêndice 4

Cálculo das propriedades do Ar:

Tabela de propriedades do ar:

Fonte: Transferência de Calor - M. Necati Ozisik



Massa específica do ar em função da temperatura - $\rho_{ar}(T)$:

$$u_{\rho(T)} = \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right) \right]^* u_{(T)}$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$$

$$T_1 = 76,85^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 276,85^\circ\text{C}$$

$$T_m = 176,85^\circ\text{C}$$

$$\rho_1 = 0,9980 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho_2 = 1,0392 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho_m = 0,7922 \text{ kg / m}^3$$

$$\frac{d\rho}{dT} = 0,000206 \text{ kg / m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u_{(T)} = 0,3^\circ\text{C}$$

$$u_{\rho(T)} = \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right) \right]^* u_{(T)} = 0,000078$$

$$u_{\rho(T)} = \pm 0,0078 \%$$

Estimando em 1% a incerteza da massa específica na Tabela de Transferência de Calor tem-se:

$$u_{\rho_{Tab}} = 1\%$$

$$u_{\rho} = \left[(0,01)^2 + (0,000078)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{\rho} = 0,010000 \quad \Rightarrow \quad \pm 1,00 \%$$

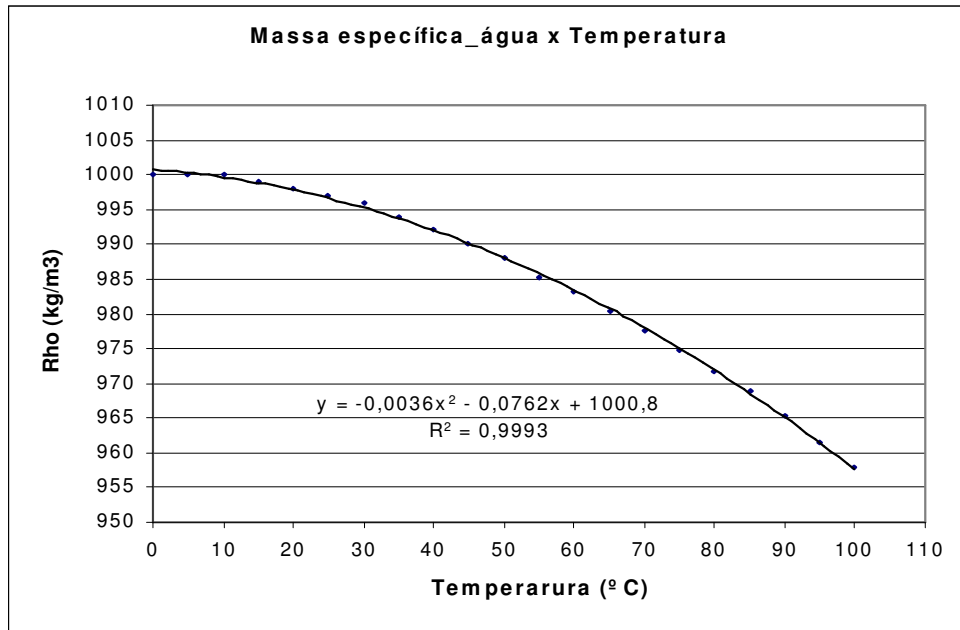
Apêndice 5

FI 1/2

Cálculo das propriedades da água:

Tabela de propriedades da água:

Fonte: Van Wylen



Equação rho_água:

$$\rho = -0,0036T^2 - 0,0762T + 1000,8$$

$$d\rho/dT = -0,0072T - 0,0762$$

$$u_{(T)} = 0,3^\circ \text{C}$$

$$T_{\text{ref}} = 85,0^\circ \text{C}$$

$$\rho = 968,992 \text{ kg/m}^3$$

$$u_{\rho(T)} = [(1/\rho)(d\rho/dT)] * u_{(T)} = 0,000213$$

$$u_{\rho(T)} = \pm 0,0213 \%$$

Estimando em 1% a incerteza da massa específica na Tabela de Termodinâmica tem-se:

$$u_{\rho_{\text{Tab}}} = 1\%$$

$$u_{\rho} = [(0,01)^2 + (0,000213)^2]^{1/2}$$

$$u_{\rho} = 0,010002 \implies \pm 1,00 \%$$

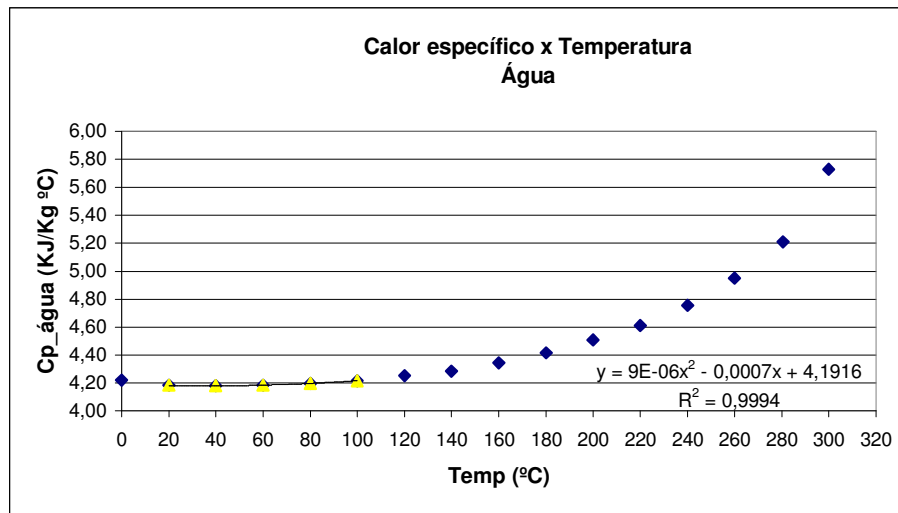
Apêndice 5

FI 2/2

Calor específico da água (fase líquida) a pressão de 1 atm:

Tabela de propriedades da água:

Fonte: Transferência de Calor - M. Necati Ozisik



Calor específico à pressão constante do ar em função da temperatura - $c_{p_agua}(T)$:

Equação c_{p_agua} :

$$c_p = 9E-06T^2 - 0,0007T + 4,1916$$

$$dc_p/dT = 18E-06T - 0,0007$$

$$u_{(T)} = 0,3^\circ \text{C}$$

$$T_{ref} = 85,0^\circ \text{C}$$

$$c_p = 4,197 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$u_{cp(T)} = [(1/c_p)(dc_p/dT)]^* u_{(T)} = 5,933E-05$$

$$u_{cp(T)} = \pm 0,0059 \%$$

Estimando em 1% a incerteza do calor específico na Tabela de Transferência de Calor tem-se:

$$u_{cp_Tab} = 1\%$$

$$u_{cp} = [(0,01)^2 + (0,000059)^2]^{1/2}$$

$$u_{cp} = 0,010000 \implies \pm 1,00 \%$$

Apêndice 6

FI 1/3

Algoritmo da simulação numérica – MatLab

```

%MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE QUARTA ORDEM
clear all
clc
%CONDIÇÕES INICIAIS
%F = dT/dt
disp(' CONDIÇÃO INICIAL ' );
disp(' PASSO "h" ');
h = input('Entre com o passo h : ');
disp(' TEMPO TOTAL ' );
tm = 85; %input('Entre com o tempo máximo (min): ');
D_S1 = Dad_Sim28;
Te = input('Entre com o valor da Temperatura de estabilização "Te"
da água (°C): ');
%SOLUÇÃO:
t(1) = 0;
T(1) = Temp0;
k = 1;
while t(k) < tm
    %Temperatura da água sem Perda de Calor na URC
    TAGS(k) = T(k) + E*(Cmin*(Tg_e-T(k)))/Cmax;
    Tg_sl = 8E-05*T(k)^3 - 0.0182*T(k)^2 + 1.9831*T(k) + 58.577;
    Tg_s = Tg_sl;
    %Perda de Calor no Trocador
    DTML1 = ((Tg_e-Tamb)-(Tg_s-Tamb))/log((Tg_e-Tamb)/(Tg_s-Tamb));
    Qp1(k) = UA1*DTML1*60;
    Tp1 = (Qp1(k)/Cmax);
    Tags(k) = TAGS(k)-Tp1;
    t(k+1) = t(k)+h;
    f1 = funfrk28(T(k), Tags, k, Te, Tm);
    f2 = funfrk28(T(k)+(h/2)*f1, Tags, k, Te, Tm);
    f3 = funfrk28(T(k)+(h/2)*f2, Tags, k, Te, Tm);
    f4 = funfrk28(T(k)+h*f3, Tags, k, Te, Tm);
    T(k+1) = T(k)+(h/6)*(f1+2*f2+2*f3+f4);
    %DeltaT da Água no Trocador
    G1 = Tags(k);
    G2 = T(k);
    DeltaTA(k,1) = G1 - G2;
    %Perda de Calor no Circuito
    Qp2 = 2.22*60;
    Tp2 = Qp2/(Cmax);
    if k >= 2
        %DTML2 = ((T-Tamb)-(T(k-1)-Tamb))/log((T-Tamb)/(T(k-1)-
Tamb));
        %Qp2 = UA2*DTML2;
        %Tp2 = Qp2/Cmax;
        T(k) = T(k) - Tp2;
    end
    k = k + 1;
end

%Tags para o último loop
TAGS(n) = T(n) + E*(Cmin*(Tg_e-T(n)))/Cmax;
Tg_s = 8E-05*T(n)^3 - 0.0182*T(n)^2 + 1.9831*T(n) + 58.577;
DTML1 = ((Tg_e-Tamb)-(Tg_s-Tamb))/log((Tg_e-Tamb)/(Tg_s-Tamb));
Qp1(n) = UA1*DTML1*60;
Tp1 = (Qp1(n)/Cmax);

```

Apêndice 6

FI 2/3

```

Tags(n) = TAGS(n)-(Qp1(n)/Cmax);
%Matriz de Tags calculado
for i=1:1:n
    Tags_calc(i,1) = Tags(i);
end
%DeltaTA para o último loop
DeltaTA(n,1) = Tags_calc(n,1)-T(n);

%Curva de temperatura ajustada no Excel® - Teste Cog. 28kW dia
29/06/06
TAGE = -0.0007*t1.^2 + 0.6721*t1 + 28.153;
TAGS = -0.0009*t1.^2 + 0.6833*t1 + 32.129;
%Temperatura TAGE_real
TAGE_real = TAGEmed28;
TAGS_real = TAGSmed28;

%Fluxo de massa da água quente
for i = 1:n
    if T(i) < Te
        mc1 = 0;
        MQ(i,1) = mc1*((Tm-Tamb)/(T(i)-Tamb));
    end
    if T(i) >= Te
        mc2 = mc*1;
        MQ(i,1) = mc2*((Tm-Tamb)/(T(i)-Tamb));
    end
    %Taxa de Calor Recuperado
    TxRec(i,1) = DeltaTA(i,1)*Cmax/60;
    %Fluxo de massa da água de consumo (mistura)
    MC(i,1) = mc;
end

% Somatório da Taxa de Recuperação de Calor - Reg Transiente e
Permanente
SumTxRecT = 0;
SumTxRecP = 0;
c1 = 0;
TempAq = 18; %Tempo para aquecimento até a Temperatura de
estabilização
for i = 1:n
    s = t(i);
    if s < TempAq
        c1 = c1+1;
        SumTxRecT = SumTxRecT + TxRec(c1,1);
        c2 = c1;
    elseif s > TempAq
        c2 = c2+1;
        SumTxRecP = SumTxRecP + TxRec(c2,1);
    end
    MedTxRecT = SumTxRecT/c1;
    MedTxRecP = SumTxRecP/(n-1-c1);
End

```

Apêndice 6

FI 3/3

```

%Dad_Sim28
function Dad_S1 = Dad_Sim28

Tg_e = 296.61; %Temperatura média dos gases de entrada [°C]
Temp0= 28.65; %Temperatura inicial T0 [°C]
Tamb = 19.85; %Temperatura ambiente Tamb [°C]
ma = 2.899*60; %Fluxo de massa da água que circula no sistema
[kg/min]
mg = 0.287*60; %Fluxo de massa dos gases [kg/min]
mc = 36.85; %input('Entre com o valor da vazão de consumo:')
[l/min]
mq = 0; %input('Entre com o valor da vazão de água
quente: '); [l/min]
msist = 1042.00; %Massa de água do sistema [kg]
cva = 4.184; %Calor específico a volume constante da água
[kj/kg°C]
cpa = 4.184; %Calor específico a pressão constante da água
[kj/kg°C]
cpam = 4.186; %Calor específico médio a pressão constante da
água [kj/kg°C]
cpgm = 1.029; %Calor específico médio a pressão constante dos
gases [kj/kg°C]
E = 0.7042; %Efetividade do trocador de calor %0.6772;
Cmin = mg*cpgm; %Taxa da capacidade térmica máxima [kj/min°C]
Cmax = ma*cpam; %Taxa da capacidade térmica máxima [kj/min°C]
UA1 = 0.0101; %Parâmetro de Transferência de perda de calor do
troc. [kW/°C]
UA2 = 0.2698; %Parâmetro de Transferência de perda de calor do
troc. [kW/°C]
Tg_s0 = 132.00; %Temperatura média dos gases de saída no trocador
[°C]
Tm = 40.00; %Temperatura da mistura da água (consumo) [°C]

Dad_S1 = [Tg_e;Temp0;Tamb;ma;mg;mc;mq;msist;cva;cpa;cpam;cpgm;E;
Cmin;Cmax;UA1;UA2;Tg_s0;Tm];

%funfrk28
%COGERAÇÃO: MODELO - ÁGUA QUENTE+FRIA (Reservatório e misturador)

function F = funfrk28(T,Tags,k,Te,Tm)
D_S1 = Dad_Sim28;
rho_f = -0.0036*Tamb^2 - 0.0762*Tamb + 1000.8;
rho_q = -0.0036*T^2 - 0.0762*T + 1000.8;
dens = rho_q/rho_f;
mc3 = mc2*rho_q*.001; %(kg/min);

if T < Te
    mc = mc1;
end
if T >= Te;
    mc = mc3;
end

%Balanco de energia no reservatório + misturador
F = ((ma*Tags(k) + mc*((Tm-Tamb)/(T-Tamb))*Tamb*dens) -...
T*(ma + mc*((Tm-Tamb)/(T-Tamb))))/msist;

```

Apêndice 7

Composição e massa molecular do gás natural

			09/Jun	09/Jun	20/Jun	20/Jun	21/Jun	21/Jun	23/Jun	23/Jun	29/Jun	29/Jun
Componente		M _i kg / kmol	09/Jun		20/Jun		21/Jun		23/Jun		29/Jun	
			y _i Fração Molar	y _i M _i kg/kmol	y _i Fração Molar	y _i M _i kg/kmol	y _i Fração Molar	y _i M _i kg/kmol	y _i Fração Molar	y _i M _i kg/kmol	y _i Fração Molar	y _i M _i kg/kmol
<i>Metano</i>	CH ₄	16,040	0,93585	15,01097	0,95506	15,31913	0,95613	15,33625	0,97545	15,64621	0,96289	15,44470
<i>Etano</i>	C ₂ H ₆	30,070	0,04497	1,35235	0,02948	0,88638	0,02849	0,85663	0,01200	0,36083	0,02111	0,63485
<i>Propano</i>	C ₃ H ₈	44,097	0,00773	0,34098	0,00484	0,21348	0,00486	0,21409	0,00235	0,10368	0,00512	0,22572
<i>Iso-butano</i>	i C ₄ H ₁₀	58,124	0,00022	0,01297	0,00021	0,01195	0,00018	0,01038	0,00019	0,01114	0,00038	0,02198
<i>Butano normal</i>	n C ₄ H ₁₀	58,124	0,00040	0,02317	0,00039	0,02240	0,00032	0,01886	0,00034	0,01963	0,00064	0,03703
<i>Iso-pentano</i>	i C ₅ H ₁₂	72,151	0,00006	0,00412	0,00006	0,00410	0,00004	0,00314	0,00004	0,00303	0,00008	0,00550
<i>Pentano normal</i>	n C ₅ H ₁₂	72,151	0,00006	0,00440	0,00006	0,00440	0,00004	0,00322	0,00004	0,00305	0,00008	0,00560
<i>Hexano</i>	C ₆ H ₁₄	86,178	0,00004	0,00378	0,00004	0,00328	0,00002	0,00207	0,00001	0,00111	0,00004	0,00305
<i>Nitrogênio</i>	N ₂	28,013	0,00777	0,21774	0,00701	0,19641	0,00697	0,19534	0,00694	0,19431	0,00725	0,20315
<i>Dióxido de carbono</i>	CO ₂	44,010	0,00289	0,12725	0,00287	0,12612	0,00294	0,12954	0,00264	0,11605	0,00243	0,10676
			1,00000	17,098	1,00000	16,788	1,00000	16,770	1,00000	16,459	1,00000	16,688

Apêndice 8

Cálculo de incerteza do PCI do gás natural

Valores do PCSi, em kJ/mol [NIST, 2006]

		Média	Incerteza
Metano	CH ₄	890,35	0,30
Etano	C ₂ H ₆	1559,90	0,46
Propano	C ₃ H ₈	2204,00	0,54
Iso-butano	i C ₄ H ₁₀	2869,00	0,59
Butano normal	n C ₄ H ₁₀	2877,50	0,63
Iso-pentano	i C ₅ H ₁₂	3535,40	0,96
Pentano normal	n C ₅ H ₁₂	3535,40	0,96
Hexano*	> C ₆ H ₁₈	4194,80	0,96
Dióxido de carbono	CO ₂	0,00	0,00
Água	H ₂ O	0,00	0,00

*Fonte: Coleção Schaun

Estimado

1%

		m _i (CEG)	PCI _i	m _i PCI _i	UPCI _i	U _{mi}	u _{mi}	u _{PCli}	(PCI _i +u _{mi}) ²	(m _i +u _{PCli}) ²
Metano	CH ₄	0,935846	890,35	833,231	0,300	0,0093585	5,403E-03	0,173	2,3142E+01	2,6274E-02
Etano	C ₂ H ₆	0,044974	1559,90	70,154	0,460	0,0004497	2,597E-04	0,266	1,6405E-01	1,4266E-04
Propano	C ₃ H ₈	0,007733	2204,00	17,042	0,540	0,0000773	4,464E-05	0,312	9,6815E-03	5,8117E-06
Iso-butano	i C ₄ H ₁₀	0,000223	2869,00	0,640	0,590	0,0000022	1,289E-06	0,341	1,3669E-05	5,7806E-09
Butano normal	n C ₄ H ₁₀	0,000399	2877,50	1,147	0,630	0,0000040	2,301E-06	0,364	4,3851E-05	2,1020E-08
Iso-pentano	i C ₅ H ₁₂	0,000057	3535,40	0,202	0,960	0,0000006	3,295E-07	0,554	1,3567E-06	1,0004E-09
Pentano normal	n C ₅ H ₁₂	0,000061	3535,40	0,216	0,960	0,0000006	3,522E-07	0,554	1,5502E-06	1,1430E-09
Hexano	C ₆ H ₁₈	0,000044	45101,00	1,978	0,960	0,0000004	2,532E-07	0,554	1,3036E-04	5,9064E-10
Dióxido de carbono	CO ₂	0,002892	0,00	0,000	0,000	0,0000289	1,669E-05	0,000	0,0000E+00	0,0000E+00
Água	H ₂ O	0,000000	0,00	0,000	0,000	0,0000000	0,000E+00	0,000	0,000E+00	0,000E+00
		0,992228		-923,775					23,31638	0,02642

u_{PCS} = 4,831 kJ/mol

U_{PCS} = 9,663 kJ/mol

M_{GN} = 0,712 kg/Nm³

PCS = 923,775 +/-

PCS = 54029,052 +/-

==> 1,05 %

9,663 kJ/mol

567,305 kJ/kg

PCS: 10% > PCI

ρ_{GN} = 0,712 kg/Nm³

PCI = 48626,147 kJ/kg

PCI = 34642,726 kJ/Nm³

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 1/6

TESTE DE COGERAÇÃO DATA: 09/06/06 H INICIO: 17:40 H FINAL: 20:40 Temp_Rio 22,62 °C

Teste	Condição do Teste	Hora	T _{ADM_AR} T _{AMB_MICROT} (°C)	PSUCÇÃO_AR (kPa)	TET (°C)	RPM	T _{GN} °C	T _{GE} °C	T _{GS} °C	ΔT _G (T _{GE} - T _{GS}) (°C)
-	Estabilização	17:40								
0		18:35	26,3	99,6	594	96216	21,34	298,33	218,93	79,40
1	100% Carga	18:40	29,5	99,7	593	96320	21,29	298,63	142,42	156,21
2	(28 kW)	18:45	29,4	99,6	593	96258	21,25	298,76	141,67	157,09
3		18:50	29,4	99,7	593	96278	21,21	298,63	142,54	156,08
4		18:55	29,1	99,7	593	96342	21,20	298,37	141,48	156,89
Média			29,4	99,68	593,00	96299,50	21,24	298,60	142,03	156,57
u_padrao - Desv_Pd			0,17	0,05	0,00	38,34	0,04	0,16	0,53	0,50
U_medidor			0,50		1,10		0,30	0,30	0,30	0,30
u_medidor			0,25		0,55		0,15	0,15	0,15	0,15
u_Padrão combinada			0,30		0,55		0,16	0,22	0,55	0,52
U_expandida - t_Student ou k=2			1,01		1,82		0,51	0,74	1,83	1,72
u = U/2			0,50		0,91		0,26	0,37	0,92	0,86
-	Estabilização	19:00								
0		19:10	28,7	99,7	596	90360	21,16	283,23	130,80	152,43
5	75% Carga	19:15	28,0	99,6	595	90324	21,17	283,40	130,37	153,04
6	(21 kW)	19:20	29,4	99,7	595	90306	21,14	283,42	130,12	153,30
7		19:25	29,3	99,7	593	90490	21,14	282,92	130,08	152,85
8		19:30	29,2	99,7	593	90676	21,15	283,57	130,20	153,38
Média			29,0	99,68	594,00	90449,00	21,15	283,33	130,19	153,14
u_padrao - Desv_Pd			0,66	0,05	1,15	172,51	0,01	0,28	0,13	0,24
U_medidor			0,50		1,10		0,30	0,30	0,30	0,30
u_medidor			0,25		0,55		0,15	0,15	0,15	0,15
u_Padrão combinada			0,70		1,28		0,15	0,32	0,20	0,29
U_expandida - t_Student ou k=2			2,32		4,23		0,50	1,06	0,66	0,95
u = U/2			1,16		2,12		0,25	0,53	0,33	0,47
-	Estabilização	19:32								
0		19:45	29,5	99,7	601	80732	21,18	260,54	117,24	143,30
9	50% Carga	19:50	29,5	99,7	603	80644	21,10	260,76	116,24	144,53
10	(14 kW)	19:55	29,2	99,8	600	80586	21,04	260,88	115,60	145,28
11		20:00	27,0	99,7	601	80322	21,00	259,80	114,82	144,98
12		20:05	28,7	99,8	603	80454	20,98	260,24	114,45	145,79
Média			28,6	99,75	601,75	80501,50	21,03	260,42	115,28	145,14
u_padrao - Desv_Pd			1,12	0,06	1,50	143,67	0,06	0,50	0,80	0,53
U_medidor			0,50		1,10		0,30	0,30	0,30	0,30
u_medidor			0,25		0,55		0,15	0,15	0,15	0,15
u_Padrão combinada			1,14		1,60		0,16	0,52	0,81	0,55
U_expandida - t_Student ou k=2			3,79		5,29		0,53	1,72	2,70	1,82
u = U/2			1,89		2,64		0,27	0,86	1,35	0,91
-	Estabilização	20:08								
0		20:20	29,3	99,7	632	67816	20,94	240,98	103,19	137,79
13	25% Carga	20:25	28,3	99,6	630	67722	20,89	241,12	101,92	139,21
14	(7 kW)	20:30	27,5	99,7	632	67628	20,84	240,38	100,87	139,51
15		20:35	29,4	99,7	633	67732	20,83	240,78	99,91	140,86
16		20:40	28,8	99,7	630	67774	20,81	240,64	99,16	141,48
Média			28,5	99,68	631,25	67714,00	20,84	240,73	100,46	140,26
u_padrao - Desv_Pd			0,80	0,05	1,50	61,60	0,03	0,31	1,19	1,08
U_medidor			0,50		1,10		0,30	0,30	0,30	0,30
u_medidor			0,25		0,55		0,15	0,15	0,15	0,15
u_Padrão combinada			0,84		1,60		0,15	0,35	1,20	1,09
U_expandida - t_Student ou k=2			2,79		5,29		0,51	1,14	3,99	3,62
u = U/2			1,39		2,64		0,25	0,57	1,99	1,81

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 2/6

PCI_GN = 34721,28 kJ/Nm³ (CEG)

T _{AG,E} °C	T _{AG,S} °C	ΔT _{AG} (T _{AG,S} - T _{AG,E}) (°C)	Média T _{AG} °C	T _{AG,S} Painel (°C)	∇ _{GN} m ³ /s	∇ _{GN,STD} Nm ³ /s	ρ _{GN} kg/m ³	M _{GN} kg/s	P _{GN} Pa
				61,00					
77,93	80,84	2,91	79,39	80,00	0,002413	0,004359	1,307	0,003152	85784,616
76,99	80,52	3,53	78,76	79,30	0,002381	0,004304	1,307	0,003112	85865,450
76,36	79,98	3,62	78,17	79,20	0,002401	0,004329	1,304	0,003130	85332,453
76,23	79,89	3,65	78,06	79,90	0,002400	0,004326	1,304	0,003128	85302,140
76,26	79,93	3,66	78,10	79,90	0,002425	0,004357	1,299	0,003150	84601,161
76,46	80,08	3,62	78,27		0,00240	0,00433	1,30346	0,00313	85275,301
0,36	0,30	0,06	0,33		0,00002	0,00002	0,00346	0,00002	518,564
0,30	0,30	0,30			0,00003				2300,000
0,15	0,15	0,15			0,00001				1150,000
0,39	0,33	0,16			0,00002	0,00014	0,03321	0,00009	1261,511
1,28	1,11	0,53			0,00007	0,00027	0,06643	0,00019	4175,600
0,64	0,55	0,27			0,00004	0,00014	0,03321	0,00009	2087,800
76,20	79,36	3,16	77,78	79,30	0,001966	0,003608	1,327	0,002609	88589,17
76,01	79,19	3,17	77,60	79,30	0,001986	0,003626	1,320	0,002622	87615,37
76,04	79,21	3,17	77,63	79,30	0,001986	0,003619	1,317	0,002617	87225,73
75,84	79,03	3,19	77,43	79,30	0,001991	0,003613	1,312	0,002613	86467,91
75,90	79,11	3,21	77,50	79,40	0,001997	0,003626	1,313	0,002622	86583,48
75,95	79,13	3,19	77,54		0,00199	0,00362	1,31570	0,00262	86973,124
0,10	0,08	0,02	0,09		0,00001	0,00001	0,00376	0,00000	542,633
0,30	0,30	0,30			0,00002				2300,000
0,15	0,15	0,15			0,00001				1150,000
0,18	0,17	0,15			0,00001	0,00010	0,03086	0,00007	1271,594
0,59	0,57	0,50			0,00004	0,00021	0,06173	0,00013	4208,976
0,30	0,28	0,25			0,00002	0,00010	0,03086	0,00007	2104,488
74,77	77,23	2,46	76,00	77,70	0,001351	0,002472	1,323	0,001788	88027,75
74,29	76,73	2,44	75,51	77,10	0,001351	0,002472	1,323	0,001787	88040,38
73,72	76,19	2,47	74,95	76,60	0,001353	0,002473	1,321	0,001788	87726,52
73,23	75,70	2,46	74,47	76,10	0,001341	0,002447	1,320	0,001769	87475,18
72,68	75,15	2,47	73,91	75,60	0,001337	0,002440	1,320	0,001764	87489,70
73,48	75,94	2,46	74,71		0,00135	0,00246	1,32121	0,00178	87682,944
0,69	0,68	0,01	0,68		0,00001	0,00002	0,00160	0,00001	264,682
0,30	0,30	0,30			0,00001				2300,000
0,15	0,15	0,15			0,00001				1150,000
0,70	0,69	0,15			0,00001	0,00007	0,02943	0,00005	1180,066
2,32	2,29	0,50			0,00004	0,00014	0,05885	0,00009	3906,020
1,16	1,14	0,25			0,00002	0,00007	0,02943	0,00005	1953,010
70,31	72,10	1,79	71,21	72,70	0,000703	0,001321	1,359	0,000955	93032,49
69,44	71,23	1,79	70,34	71,80	0,000711	0,001345	1,369	0,000973	94363,72
68,76	70,54	1,79	69,65	70,80	0,000707	0,001333	1,364	0,000964	93624,22
67,73	69,55	1,82	68,64	69,90	0,000728	0,001373	1,364	0,000993	93712,63
66,92	68,74	1,81	67,83	69,10	0,000730	0,001380	1,368	0,000998	94233,63
68,21	70,01	1,80	69,11		0,00072	0,00136	1,36611	0,00098	93983,549
1,11	1,10	0,02	1,10		0,00001	0,00002	0,00254	0,00002	369,498
0,30	0,30	0,30			0,00001				2300,000
0,15	0,15	0,15			0,00000				1150,000
1,12	1,11	0,15			0,00001	0,00005	0,02863	0,00003	1207,902
3,71	3,66	0,50			0,00004	0,00010	0,05727	0,00007	3998,157
1,85	1,83	0,25			0,00002	0,00005	0,02863	0,00003	1999,079

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 3/6

P _{GN} Heat Input kW	Média Temp (T _{PROD} +T _{AMB})/2 K	P _{G, E-Tamb} Disponível kW	∇ _{AG} LPM	∇ _{AG} m ³ /s	ρ _{AG} kg/m ³	M _{AG} kg/s	C _{pAG} kJ/kg°C	P _{AG} (Recuperado) kW	P _{TURB} Demanda kW
151,36	433,627	81,93	178,427	0,002974	972,062	2,891	4,194	35,26	28,000
149,45	433,776	80,66	178,598	0,002977	972,469	2,895	4,193	42,90	28,000
150,31	433,842	80,66	178,629	0,002977	972,843	2,896	4,193	44,00	28,000
150,22	433,775	80,73	177,797	0,002963	972,916	2,883	4,193	44,14	28,000
151,27	433,645	80,55	177,443	0,002957	972,892	2,877	4,193	44,21	28,000
150,31		80,65	178,117	0,00297	972,780	2,888	4,193	43,81	28,00
0,75		0,08	0,592	0,00001	0,210	0,009	0,000	0,61	0,00
			1,781	0,00003	9,728		0,042		
			0,891	0,00001	4,864		0,021		
4,98		2,79	1,069	0,00002		0,011		3,27	
9,96		5,57	3,539	0,00006	9,728	0,022	0,042	6,54	
4,98		2,79	1,770	0,00003	4,864	0,011	0,021	3,27	
125,29	426,078	68,65	177,466	0,002958	973,093	2,878	4,193	38,18	21,000
125,91	426,163	68,53	177,534	0,002959	973,208	2,880	4,192	38,32	21,000
125,66	426,169	68,26	178,750	0,002979	973,191	2,899	4,192	38,52	21,000
125,46	425,923	68,43	178,598	0,002977	973,315	2,897	4,192	38,78	21,000
125,89	426,248	68,91	178,976	0,002983	973,270	2,903	4,192	39,05	21,000
125,73		68,53	178,465	0,00297	973,246	2,895	4,192	38,67	21,00
0,21		0,28	0,640	0,00001	0,057	0,010	0,000	0,32	0,00
			1,785	0,00003	9,732		0,042		
			0,892	0,00001	4,866		0,021		
3,84		2,16	1,098	0,00002		0,011		3,07	
7,69		4,31	3,634	0,00006	9,732	0,023	0,042	6,14	
3,84		2,16	1,817	0,00003	4,866	0,011	0,021	3,07	
85,84	414,732	51,72	174,606	0,002910	974,213	2,835	4,191	29,24	14,000
85,83	414,843	51,52	174,068	0,002901	974,521	2,827	4,191	28,97	14,000
85,86	414,900	51,63	174,252	0,002904	974,863	2,831	4,191	29,34	14,000
84,96	414,362	51,63	174,378	0,002906	975,163	2,834	4,190	29,24	14,000
84,73	414,580	51,42	173,904	0,002898	975,499	2,827	4,190	29,32	14,000
85,34		51,55	174,151	0,00290	975,012	2,830	4,191	29,22	14,00
0,59		0,10	0,20803	0,00000	0,418	0,003	0,000	0,17	0,00
			1,74151	0,00003	9,750		0,042		
			0,87075	0,00001	4,875		0,021		
2,62		1,64	0,89526	0,00001		0,010		2,97	
5,24		3,28	2,96330	0,00005	9,750	0,020	0,042	5,95	
2,62		1,64	1,48165	0,00002	4,875	0,010	0,021	2,97	
45,87	404,951	35,35	177,964	0,002966	977,120	2,898	4,188	21,71	7,000
46,71	405,022	35,43	177,796	0,002963	977,631	2,897	4,188	21,69	7,000
46,27	404,649	35,33	177,798	0,002963	978,028	2,898	4,188	21,69	7,000
47,68	404,849	35,23	177,637	0,002961	978,608	2,897	4,187	22,02	7,000
47,93	404,780	35,46	177,103	0,002952	979,068	2,890	4,187	21,93	7,000
47,15		35,36	177,584	0,00296	978,334	2,896	4,187	21,83	7,00
0,79		0,10	0,329	0,00001	0,633	0,004	0,001	0,17	0,00
			1,776	0,00003	9,783		0,042		
			0,888	0,00001	4,892		0,021		
1,84		1,40	0,947	0,00002		0,010		3,04	
3,67		2,81	3,134	0,00005	9,783	0,020	0,042	6,07	
1,84		1,40	1,567	0,00003	4,892	0,010	0,021	3,04	

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 4/6

P _{TURB} (Saída) kW	Efic_Eletr Líqu. %	Efic_Term Líqu. %	Eficiência Total %	Média T _G (T _{Ge} +T _{Gs})/2 K	C _p AR (Comb) kJ/kg K	P _G (TROC) (Utilizada) kW	P _{PERDA} (TROC) (Perdas_intern) kW	Média T _{TROC_& AMB} (T _{Gs} +T _{AMB})/2 K	C _p AR (Comb) kJ/kg K
25,280	16,70	23,30	40,00	531,781	1,038	23,60	-11,67	393,925	1,014
25,054	16,76	28,71	45,47	493,676	1,030	45,65	2,75	355,672	1,010
25,005	16,64	29,27	45,90	493,365	1,030	45,89	1,89	355,295	1,010
25,021	16,66	29,38	46,04	493,735	1,030	45,66	1,52	355,732	1,010
25,005	16,53	29,23	45,76	493,073	1,030	45,83	1,62	355,199	1,010
25,021	16,65	29,15	45,79	493,46	1,030	45,76	1,94	355,47	1,010
0,023	0,10	0,30	0,24	0,31	0,000	0,12	0,56	0,27	0,000
1,036					0,010				0,010
0,518					0,005				0,005
0,519	0,79	2,38	4,33			1,60	0,16		
1,716	1,59	4,76	8,66		0,010	3,20	0,32		0,010
0,858	0,79	2,38	4,33		0,005	1,60	0,16		0,005
20,989	16,75	30,47	47,23	480,167	1,028	40,16	1,97	349,861	1,010
21,000	16,68	30,44	47,12	480,036	1,028	40,22	1,89	349,645	1,010
20,995	16,71	30,66	47,36	479,915	1,027	40,13	1,60	349,519	1,010
20,907	16,66	30,91	47,57	479,650	1,027	40,18	1,41	349,499	1,010
20,973	16,66	31,02	47,68	480,036	1,028	40,50	1,45	349,560	1,010
20,969	16,68	30,76	47,43	479,91	1,027	40,26	1,59	349,56	1,010
0,043	0,02	0,26	0,25	0,18	0,000	0,17	0,22	0,06	0,000
1,036					0,010				0,010
0,518					0,005				0,005
0,520	0,85	2,62	4,71			1,27	0,14		
1,720	1,71	5,24	9,42		0,010	2,54	0,27		0,010
0,860	0,85	2,62	4,71		0,005	1,27	0,14		0,005
13,716	15,98	34,07	50,04	462,041	1,024	31,15	1,91	343,081	1,009
13,865	16,15	33,75	49,90	461,651	1,024	31,26	2,30	342,580	1,009
13,969	16,27	34,17	50,44	461,390	1,024	31,48	2,14	342,262	1,009
13,607	16,02	34,42	50,44	460,460	1,024	31,56	2,32	341,870	1,009
13,722	16,20	34,61	50,80	460,493	1,024	31,55	2,23	341,686	1,009
13,791	16,16	34,24	50,40	461,00	1,024	31,46	2,24	342,10	1,009
0,159	0,11	0,37	0,37	0,61	0,000	0,14	0,08	0,40	0,000
1,036					0,010				0,010
0,518					0,005				0,005
0,542	1,16	3,64	6,47			1,01	0,24		
1,793	2,32	7,28	12,94		0,010	2,03	0,48		0,010
0,897	1,16	3,64	6,47		0,005	1,01	0,24		0,005
6,916	15,08	47,32	62,40	445,235	1,022	22,30	0,60	336,056	1,009
6,861	14,69	46,43	61,12	444,670	1,021	22,57	0,88	335,420	1,008
7,108	15,36	46,87	62,24	443,771	1,021	22,63	0,94	334,894	1,008
7,037	14,76	46,19	60,95	443,494	1,021	22,75	0,72	334,417	1,008
6,938	14,47	45,75	60,22	443,048	1,021	23,01	1,08	334,040	1,008
6,986	14,82	46,31	61,13	443,75	1,021	22,74	0,91	334,69	1,008
0,109	0,38	0,47	0,83	0,68	0,000	0,19	0,15	0,60	0,000
1,036					0,010				0,010
0,518					0,005				0,005
0,529	1,95	6,69	11,93			0,95	0,13		
1,752	3,89	13,37	23,86		0,010	1,89	0,26		0,010
0,876	1,95	6,69	11,93		0,005	0,95	0,13		0,005

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 5/6

P _{TGs & Tamb} (Calor rejeitado) kW	P _{Total} kW	Heat Rate - MT kJ/kWh	Heat Rate - COG kJ/kWh	Consumo Específico Nm ³ / kWh	RAC CRMS	Fluxo de massa Ar kg/s	Fluxo de massa Ar - CRMS pph (lbmh)	Fluxo de massa Ar - CRMS kg/s	∇ _{Comb} CRMS Nm ³ /s	Consumo Específico Nm ³ / kWh
57,02	80,62	21554,90	9000,34	0,621	103	0,325	2248	0,283	0,003860	0,550
34,33	79,98	21474,62	7917,27	0,618	102	0,317	2227	0,281	0,003861	0,555
34,10	79,99	21640,86	7842,35	0,623	100	0,313	2226	0,280	0,003937	0,567
34,40	80,06	21613,05	7819,13	0,622	105	0,328	2229	0,281	0,003754	0,540
34,05	79,88	21778,59	7867,87	0,627	100	0,315	2226	0,280	0,003937	0,567
34,22	79,98	21626,78	7861,66	0,623	101,750	0,319	2227,000	0,281	0,004	0,557
0,17	0,07	124,61	42,08	0,004	2,36	0,01	1,41	0,0002	0,0001	0,0126
								0,006		
								0,003		
1,21	3,98	1031,42	465,91	0,029				0,003		
2,42	7,95	2062,83	931,81	0,058				0,009		
1,21	3,98	1031,42	465,91	0,029				0,005		
28,00	68,16	21489,76	7622,89	0,619	109	0,284	2014	0,254	0,003268	0,560
27,82	68,04	21583,91	7640,48	0,622	110	0,288	2009	0,253	0,003230	0,554
27,65	67,77	21547,26	7600,88	0,621	102	0,267	2001	0,252	0,003470	0,595
27,76	67,94	21603,40	7567,51	0,622	99	0,259	2010	0,253	0,003591	0,618
27,91	68,42	21609,43	7550,66	0,622	98	0,257	2019	0,254	0,003644	0,625
27,78	68,04	21586,00	7589,88	0,622	102,250	0,268	2009,750	0,253	0,003	0,598
0,11	0,27	28,03	39,66	0,001	5,44	0,01	7,37	0,0009	0,0002	0,0323
								0,005		
								0,003		
0,88	3,04	1104,36	467,60	0,031				0,003		
1,75	6,07	2208,71	935,21	0,062				0,009		
0,88	3,04	1104,36	467,60	0,031				0,004		
20,26	51,41	22529,76	7193,58	0,649	189	0,338	1670	0,210	0,001563	0,410
19,95	51,21	22285,42	7213,78	0,642	196	0,350	1662	0,209	0,001500	0,389
19,85	51,33	22128,36	7136,86	0,637	189	0,338	1665	0,210	0,001558	0,402
19,77	51,33	22477,35	7137,76	0,647	203	0,359	1673	0,211	0,001458	0,386
19,58	51,12	22227,89	7086,25	0,640	198	0,349	1663	0,210	0,001485	0,390
19,79	51,25	22279,76	7143,66	0,642	196,500	0,349	1665,750	0,210	0,002	0,392
0,16	0,10	146,84	52,58	0,004	5,80	0,01	4,99	0,0006	0,0000	0,0069
								0,004		
								0,002		
0,69	2,43	1602,31	560,71	0,046				0,002		
1,38	4,86	3204,63	1121,42	0,091				0,007		
0,69	2,43	1602,31	560,71	0,046				0,004		
12,88	35,18	23874,43	5768,98	0,688	161	0,154	1250	0,157	0,001373	0,715
12,69	35,26	24508,29	5889,93	0,706	153	0,149	1252	0,158	0,001447	0,759
12,53	35,17	23436,43	5784,53	0,675	163	0,157	1253	0,158	0,001360	0,689
12,32	35,07	24390,15	5906,18	0,702	163	0,162	1247	0,157	0,001353	0,692
12,29	35,30	24870,78	5977,72	0,716	157	0,157	1256	0,158	0,001415	0,734
12,46	35,20	24301,41	5889,59	0,700	159,000	0,156	1252,000	0,158	0,001	0,719
0,19	0,10	611,84	79,75	0,018	4,90	0,01	3,74	0,0005	0,0000	0,0342
								0,003		
								0,002		
0,59	2,22	3190,67	685,26	0,092				0,002		
1,18	4,43	6381,34	1370,51	0,183				0,005		
0,59	2,22	3190,67	685,26	0,092				0,003		

Apêndice 9

Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado – FI 6/6

Fluxo de massa 1 Ar + GN kg/s	Fluxo de massa 2 Ar + GN kg/s	ΔT_{Ge_AMB} ($T_{Ge}-T_{AMB}$) (°C)	ΔT_{Gs_AMB} ($T_{Gs}-T_{AMB}$) (°C)	C_{max} kW/°C	Efetividade 0 $\epsilon - \%$ C_{min}/C_{min}	C_{min} kW/°C $\epsilon (C_{max})$	C_{min} kW/°C CRMS	Efetividade 1 $\epsilon - \%$ C_{max}/C_{min}	Efetividade 2 $\epsilon - \%$ C_{max}/C_{min}
0,328	0,286	275,71	196,31	12,123	36,03	0,444	0,297	53,84	47,03
0,321	0,284	276,01	119,80	12,138	70,48	0,275	0,292	66,24	58,62
0,316	0,284	276,14	119,05	12,144	70,64	0,280	0,292	67,72	60,75
0,332	0,284	276,01	119,92	12,088	70,18	0,283	0,293	67,85	58,11
0,318	0,284	275,75	118,85	12,063	70,64	0,282	0,292	68,14	60,74
0,322	0,284	275,98	119,41	12,108	70,484	0,280	0,292	67,489	59,55
0,0069	0,0002	0,16	0,53	0,0390	0,2137	0,004	0,0002	0,8528	1,39
		0,30	0,30						
		0,15	0,15						
	0,010	0,22	0,55	0,076	0,462		0,010	15,797	
	0,019	0,74	1,83	0,153	0,925		0,020	31,595	
	0,00969	0,37	0,92	0,07642	0,46249		0,01009	15,79734	
0,287	0,256	260,61	108,18	12,067	73,63	0,250	0,263	70,01	62,53
0,291	0,256	260,78	107,75	12,073	73,79	0,250	0,263	70,32	61,79
0,270	0,255	260,79	107,49	12,155	73,92	0,251	0,262	70,97	67,07
0,261	0,256	260,30	107,45	12,146	73,81	0,254	0,263	71,23	69,75
0,260	0,257	260,95	107,58	12,171	73,85	0,255	0,264	71,20	70,50
0,270	0,256	260,71	107,57	12,136	73,845	0,253	0,263	70,930	67,28
0,0145	0,0009	0,28	0,13	0,0437	0,0597	0,002	0,0010	0,4235	3,94
		0,30	0,30						
		0,15	0,15						
	0,008	0,32	0,20	0,077	0,201		0,008	9,339	
	0,016	1,06	0,66	0,154	0,403		0,017	18,678	
	0,00793	0,53	0,33	0,07709	0,20144		0,00826	9,33896	
0,340	0,212	237,92	94,62	11,883	77,14	0,204	0,217	72,41	45,24
0,352	0,211	238,14	93,62	11,849	77,50	0,200	0,216	71,81	43,07
0,340	0,212	238,26	92,98	11,865	77,62	0,202	0,217	72,35	45,05
0,361	0,213	237,18	92,20	11,876	77,71	0,202	0,218	72,00	42,40
0,351	0,211	237,62	91,83	11,847	77,73	0,201	0,216	72,24	43,47
0,351	0,212	237,80	92,65	11,859	77,641	0,201	0,217	72,102	43,50
0,0087	0,0006	0,50	0,80	0,0138	0,1033	0,001	0,0006	0,2420	1,13
		0,30	0,30						
		0,15	0,15						
	0,007	0,52	0,81	0,072	0,874		0,007	47,478	
	0,013	1,72	2,70	0,145	1,748		0,014	94,956	
	0,00660	0,86	1,35	0,07229	0,87405		0,00685	47,478	
0,155	0,158	218,36	80,57	12,139	80,74	0,158	0,162	78,57	80,45
0,150	0,159	218,50	79,30	12,133	81,08	0,156	0,162	77,92	82,55
0,158	0,159	217,75	78,24	12,137	81,29	0,155	0,162	77,91	78,30
0,163	0,158	218,15	77,29	12,131	81,40	0,156	0,161	78,82	76,53
0,158	0,159	218,02	76,54	12,099	81,44	0,155	0,163	77,62	78,37
0,157	0,159	218,11	77,84	12,125	81,305	0,156	0,162	78,064	78,94
0,0054	0,0005	0,31	1,19	0,0172	0,1615	0,001	0,0005	0,5193	2,56
		0,30	0,30						
		0,15	0,15						
	0,006	0,35	1,20	0,074	1,450		0,006	112,438	
	0,012	1,14	3,99	0,148	2,899		0,013	224,876	
	0,00624	0,57	1,99	0,07402	1,44964		0,00642	112,438	

Apêndice 10

FI 1/3

Transferência de calor - sistema de cogeração:

Transferência de calor no Circuito:

Equação da Continuidade: $\nabla = VA$

$$\nabla = 0,002899 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diâmetro da tubulação:

$D_{\text{ext}_e} =$	0,05400m	$D_{\text{ext}_s} =$	0,03500m
$D_{\text{int}_e} =$	0,05080m	$D_{\text{int}_s} =$	0,03175m
$\text{Área}_e =$	0,00203m²	$\text{Área}_s =$	0,00079m²
$\phi_e =$	0,00160m	$\phi_s =$	0,00163m

Velocidade do fluido (água) na tubulação:

$$V_e = 1,430 \text{ m/s} \quad V_s = 3,662 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds (Re), Nusselt (Nu) e coeficiente de transferência de calor médio:

$$Re = \rho VD/\mu = VD/\nu$$

Para uma temperatura média do fluido (água) - $T_{ag} = 85^\circ\text{C}$ tem-se:

$$\begin{aligned} \nu_{ag} &= 3,465\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s} \\ k_{ag} &= 0,671 \text{ W/m K} \\ Pr_{ag} &= 2,100 \end{aligned}$$

$$Re_e = 209697 \quad Re_s = 335515$$

$$Nu = hD/k =$$

$$0,023Re^{0,8}Pr^{1/3}$$

$$Nu_e = 532,61 \quad Nu_s = 775,72$$

$$h_{e_Ag} = 7035,03 \text{ W/m}^2\text{K} \quad h_{s_Ag} = 16393,90 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Para uma temperatura média do fluido (ar) - $T_{inf} = 25^\circ\text{C}$ tem-se:

Convecção sobre um cilindro horizontal isotérmico

$$Ra_D = Gr_D Pr = g\beta(T_w - T_{inf})D^3/\nu^2 Pr$$

$$g = 9,80655 \text{ m/s}^2$$

$$T_w = 85^\circ\text{C} \quad ==> \quad 358,15 \text{ K} \quad * \text{ Parede}$$

$$T_{inf} = 25^\circ\text{C} \quad ==> \quad 298,15 \text{ K} \quad \text{externa}$$

$$T_f = 55^\circ\text{C} \quad ==> \quad 328,15 \text{ K} \quad \text{do tubo}$$

$$\Delta T_b = 60^\circ\text{C} \quad ==> \quad 333,15 \text{ K}$$

$$\beta = 0,0030 \text{ K}^{-1}$$

$$\nu_{ar} = 1,90\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr_{ar} = 0,70181$$

$$k_{ar} = 0,02837 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Ra_{D_e} = 3,033\text{E+}06 \quad Ra_{D_s} = 8,258\text{E+}05$$

Apêndice 10

FI 2/3

Coefficiente de transferência de calor médio (ar):

Equações para convecção livre sobre um cilindro horizontal longo:

$Nu_{m_e} =$	19,91	$Nu_{m_s} =$	13,76
$h_{m_e} =$	10,46 W/m²°C	$h_{m_s} =$	11,15 W/m²°C
$k_{isol} =$	0,035kcal/m h°C	\implies	$k_{isol} =$ 0,040705W/m°C
$k_{cobr} =$	331,900kcal/m h°C	\implies	$k_{cobr} =$ 386W/m°C
$E_{isol} =$	0,010m		
$PI =$	3,1416		
$H_e =$	22m		
$H_s =$	21m		
$r_{1_e} =$	0,0254m	$r_{1_{out}} =$	0,0159m
$r_{2_e} =$	0,0270m	$r_{2_{out}} =$	0,0175m
$r_{3_e} =$	0,0370m	$r_{3_{out}} =$	0,0275m
$h_o =$	11,15W/m²°C		
$h_{a_e} =$	7035,03W/m²°C	$h_{a_s} =$	16393,90W/m²°C
$T_a =$	85,00°C		
$T_o =$	25,00°C		
$R_{ag_e} =$	4,049E-05°C/W	$R_{ag_s} =$	2,912E-05°C/W
$R_{1_e} =$	1,145E-06°C/W	$R_{1_s} =$	1,913E-06°C/W
$R_{2_e} =$	0,056°C/W	$R_{2_s} =$	0,084°C/W
$R_{ar_e} =$	0,024°C/W	$R_{ar_s} =$	0,039°C/W
$R_{eq_e} =$	0,080°C/W	$R_{eq_s} =$	0,123°C/W
$Q = (T_a - T_o)/R_{eq}$			
$Q_e =$	749,399W	$Q_s =$	487,737W
$Q_{Total} =$	1237,136W		
$\Delta T_{ag_e} =$	0,03°C	$\Delta T_{ag_s} =$	0,01°C
$\Delta T_{1_e} =$	0,001°C	$\Delta T_{1_s} =$	0,001°C
$\Delta T_{2_e} =$	41,96°C	$\Delta T_{2_s} =$	41,05°C
$\Delta T_{ar_e} =$	18,00°C	$\Delta T_{ar_s} =$	18,94°C

Transferência de calor no Reservatório térmico (Boiler):

Diâmetro e comprimento do reservatório:

$D_{ext_res} =$	0,665m		
$D_{int_res} =$	0,664m		
$D_{ext_câm} =$	0,565m	Espessura da câmara interna:	0,0025m
$D_{int_câm} =$	0,560m		
$r_{ext_res} =$	0,3325m		
$r_{int_res} =$	0,3320m		
$r_{ext_câm} =$	0,2825m		
$r_{int_câm} =$	0,2800m		
$H_{res} =$	3,460m		

Apêndice 10

FI 3/3

Isolamento térmico: Poliuretano expandido

$$E_{\text{isol_res}} = 0,050\text{m}$$

$$k_{\text{iso_res}} = 0,018\text{kcal/m h}^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad k_{\text{iso_res}} = 0,020934\text{W/m}^\circ\text{C}$$

Câmara interna : Aço inoxidável AISI 304 (Cromo-níquel)

$$k_{\text{aço_inox}} = 12,984\text{kcal/m h}^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad k_{\text{aço_inox}} = 15,1\text{W/m}^\circ\text{C}$$

Câmara externa : Alumínio

$$k_{\text{aço_inox}} = 175,408\text{kcal/m h}^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad k_{\text{iso_resl}} = 204\text{W/m}^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{ag}} = 90,00\text{W/m}^2\text{C}$$

$$h_{\text{ar}} = 11,15\text{W/m}^2\text{C}$$

$$R_{\text{ag_res}} = 1,825\text{E-}03\text{C/W}$$

$$R_{1_res} = 2,708\text{E-}05\text{C/W}$$

$$R_{2_res} = 3,548\text{E-}01\text{C/W}$$

$$R_{3_res} = 3,393\text{E-}07\text{C/W}$$

$$R_{\text{ar_res}} = 1,240\text{E-}02\text{C/W}$$

$$R_{\text{isol_res_cil}} = 3,548\text{E-}01\text{C/W}$$

$$R_{\text{eq_res}} = 0,369\text{C/W}$$

$$R_{\text{isol_res_lat}} = 9,526\text{C/W}$$

$$Q_{\text{res}} = (T_a - T_o) / R_{\text{eq}}$$

$$Q_{\text{res_cil}} = 162,578\text{W}$$

$$Q_{\text{Total_Sist}} = 1399,714\text{W}$$

$$Q_{\text{res_linear}} = 3,149\text{W}$$

$$\Delta T_{\text{ag_e_res}} = 0,30\text{C}$$

$$\Delta T_{1_e} = 0,00\text{C}$$

$$\Delta T_{2_e} = 57,68\text{C}$$

$$\Delta T_{3_e} = 0,00\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{ar_res}} = 2,02\text{C}$$

Propriedades do fluido (água):

$$m = 967,000\text{kg}$$

$$c_p = 4,185\text{kJ / kg }^\circ\text{C}$$

Intervalo sem cogeração:

$$\text{Int. s/cog} = 21,00\text{h} \quad \Rightarrow \quad 75600\text{s}$$

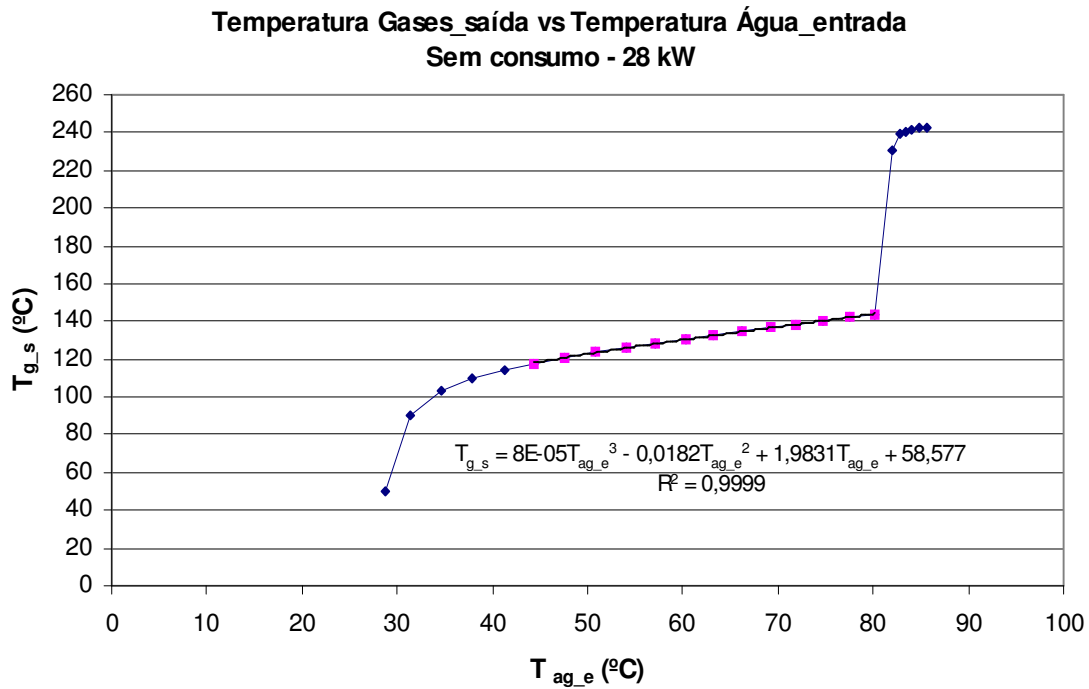
Variação de Temperatura:

$$Q_{\text{res}} = 162,578\text{W}$$

$$\Delta T = 3,04\text{C}$$

Apêndice 11

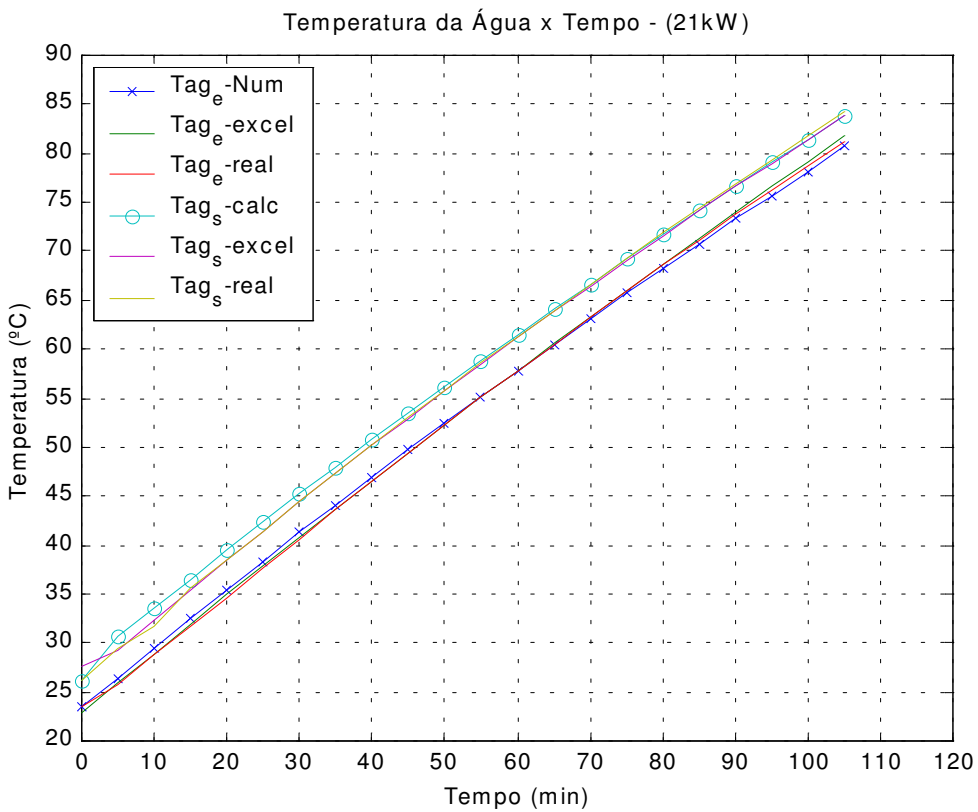
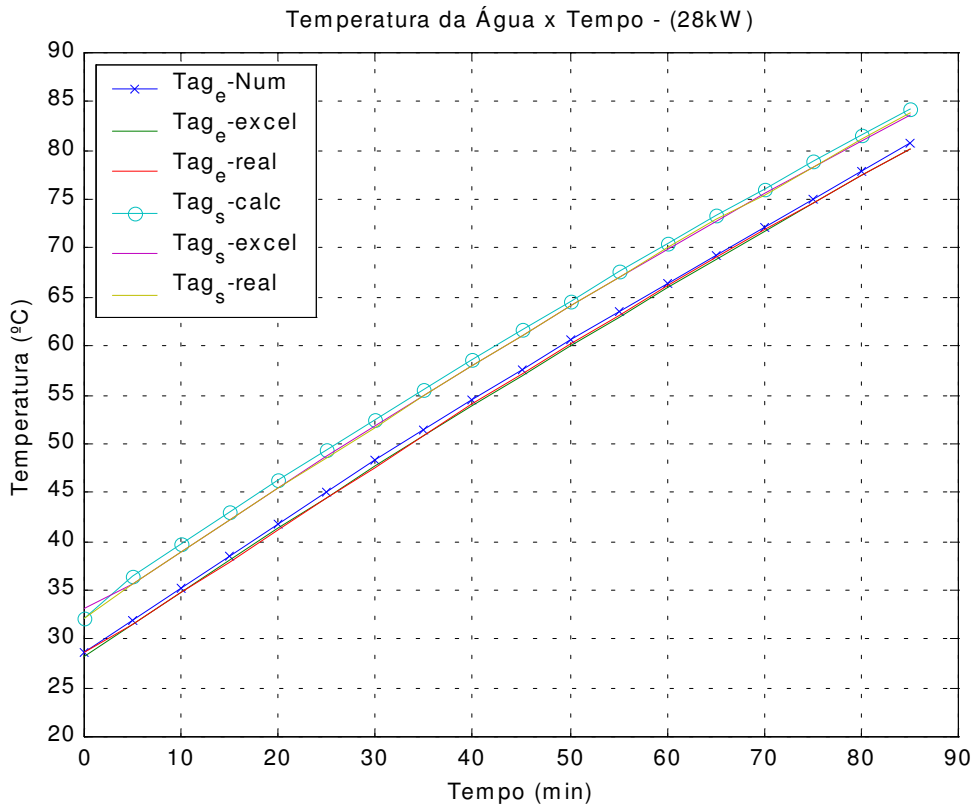
Gráfico – $T_{g,s}$ x $T_{ag,e}$



Carga	Equação (Ajuste de curvas)
28 kW	$T_{g,s} = 8E-05T_{ag,e}^3 - 0,0182 T_{ag,e}^2 + 1,9831 T_{ag,e} + 58,577$
21 kW	$T_{g,s} = -0,0027 T_{ag,e}^2 + 1,05 T_{ag,e} + 66,89$
14 kW	$T_{g,s} = -0,0024 T_{ag,e}^2 + 1,0718 T_{ag,e} + 49,152$
7 kW	$T_{g,s} = -0,0028 T_{ag,e}^2 + 1,1211 T_{ag,e} + 35,662$

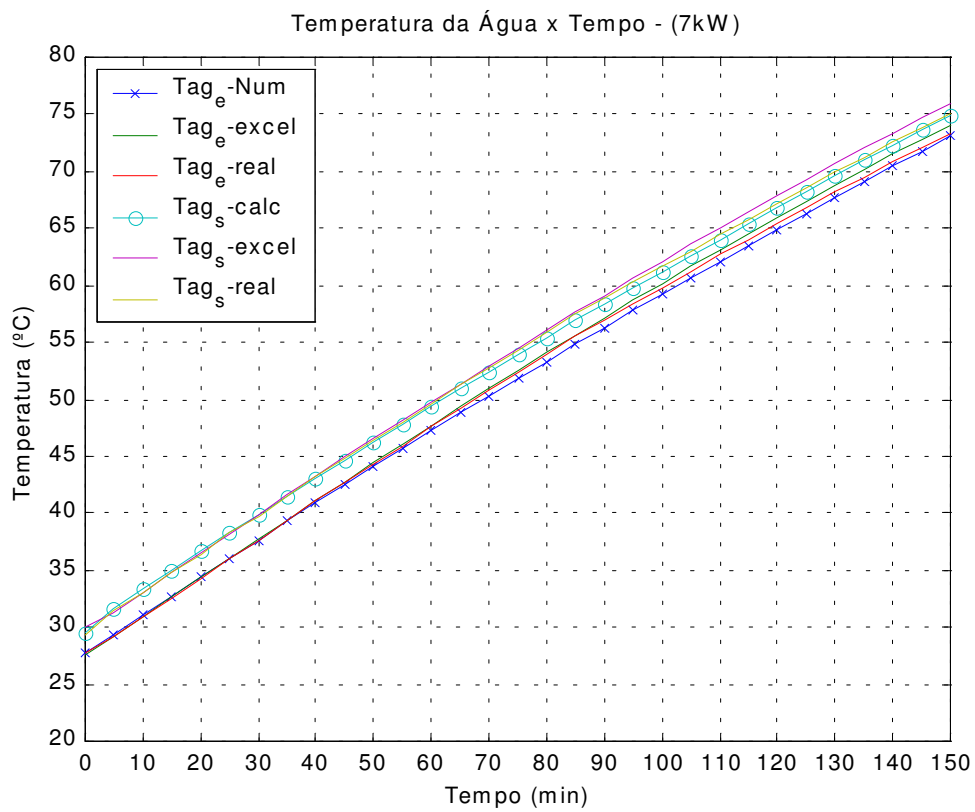
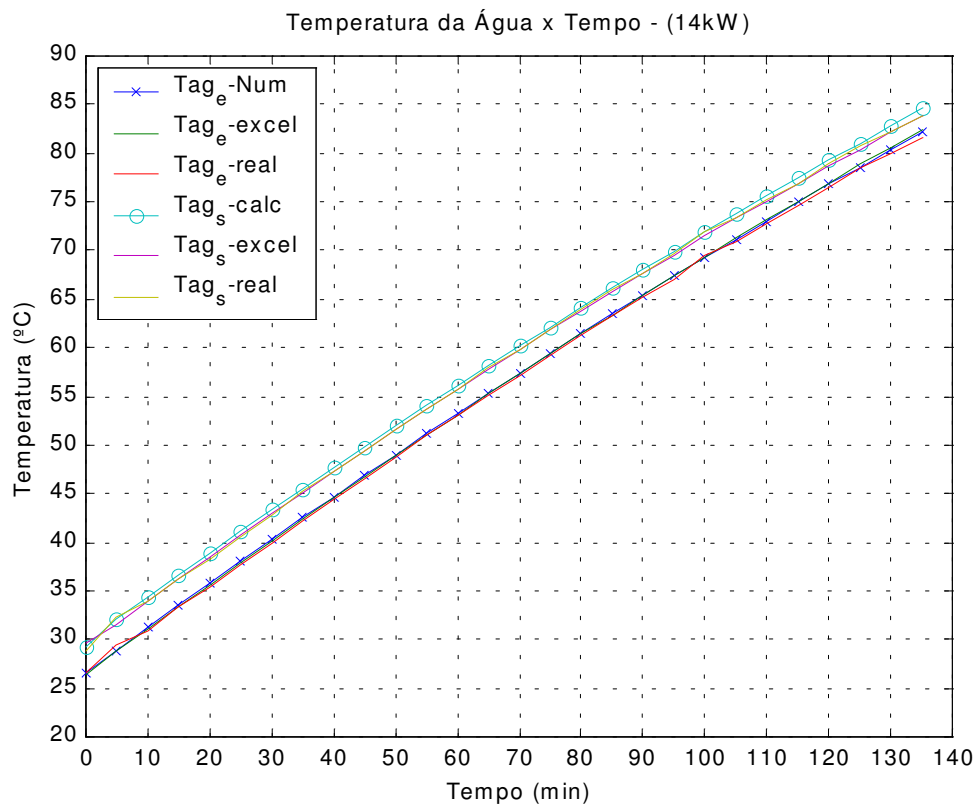
Apêndice 12

Cogeração: Simulação real e numérica – FI 1/2

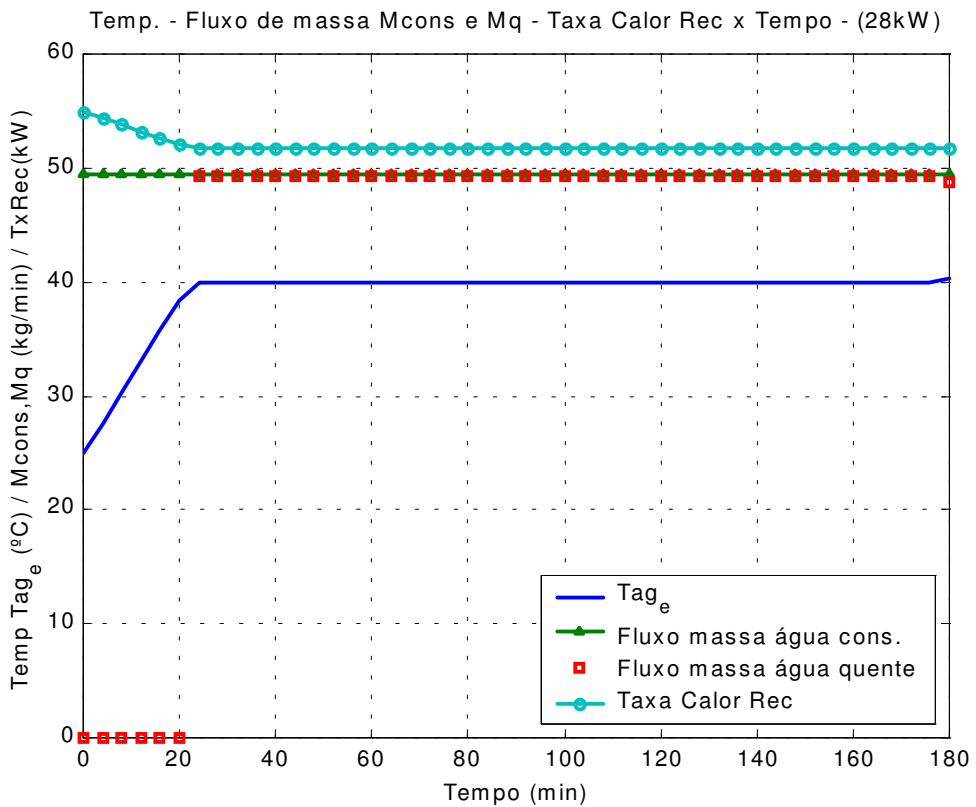
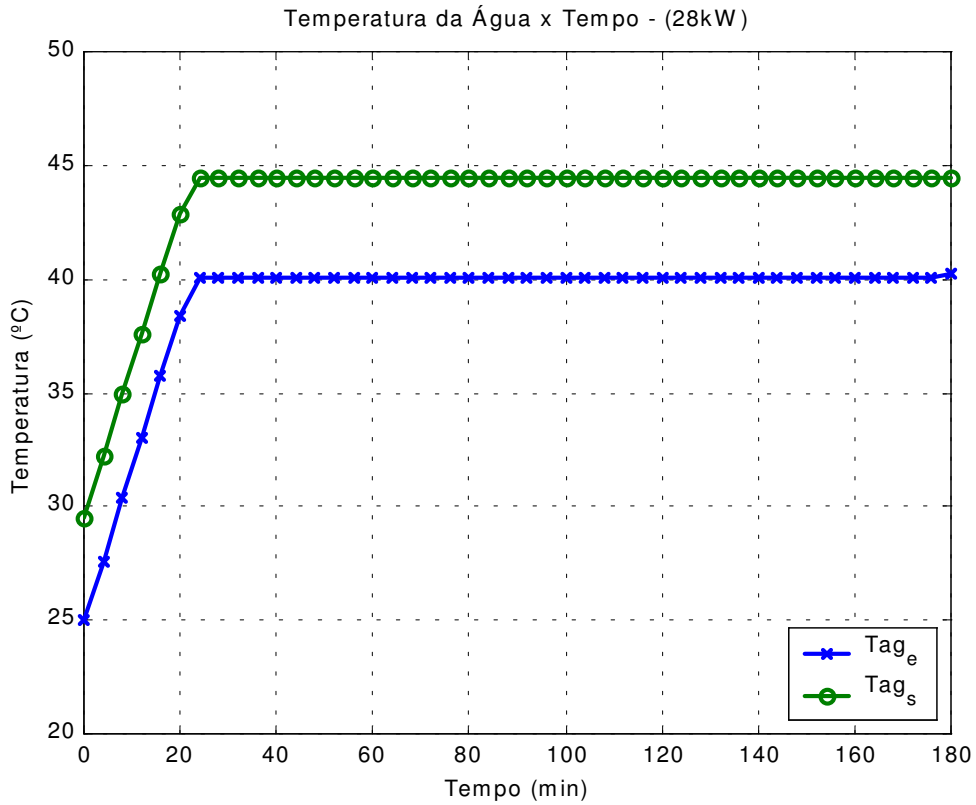


Apêndice 12

Cogeração: Simulação real e numérica – FI 2/2

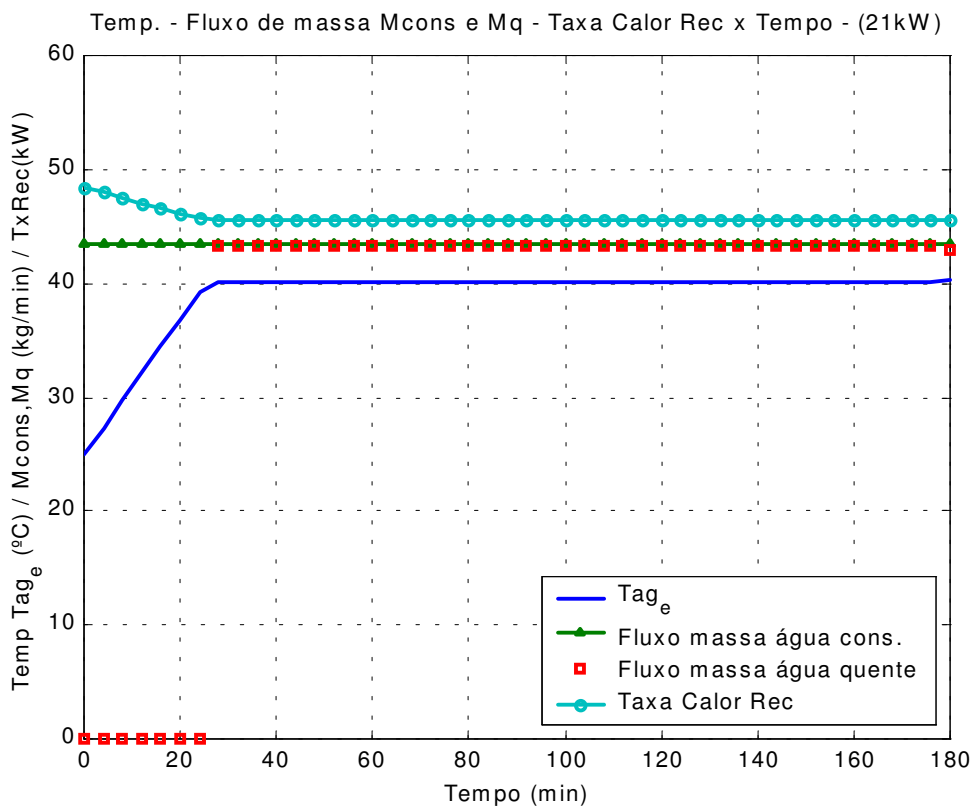
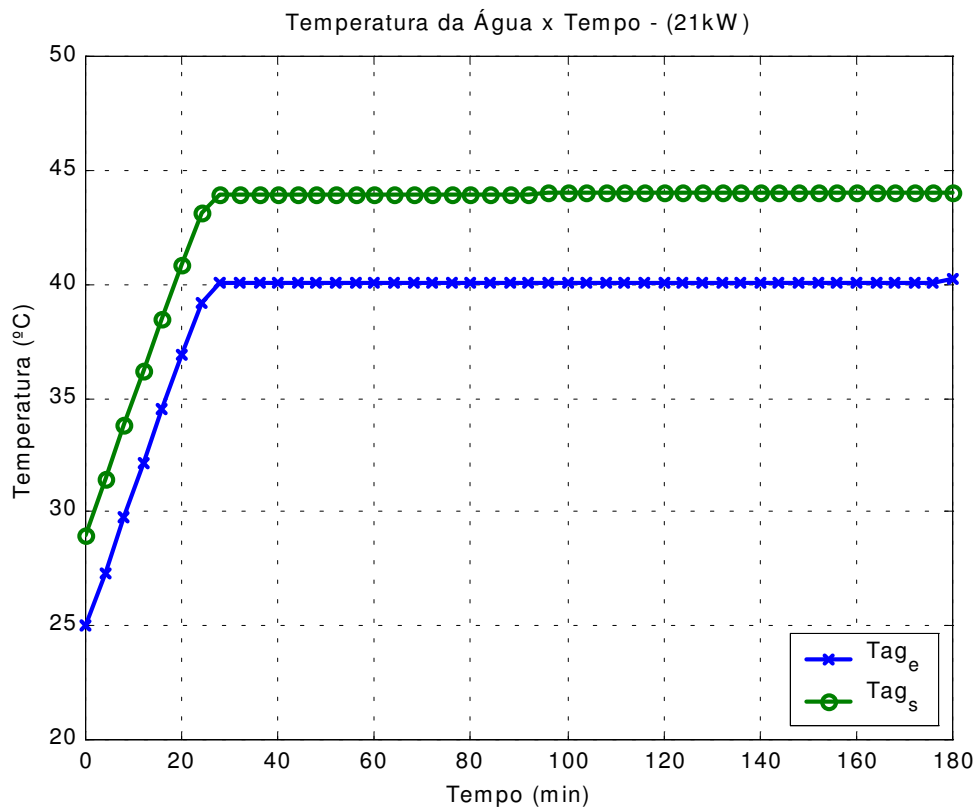


Apêndice 13 Cogeração: Simulação numérica – 1º Caso - FI 1/4



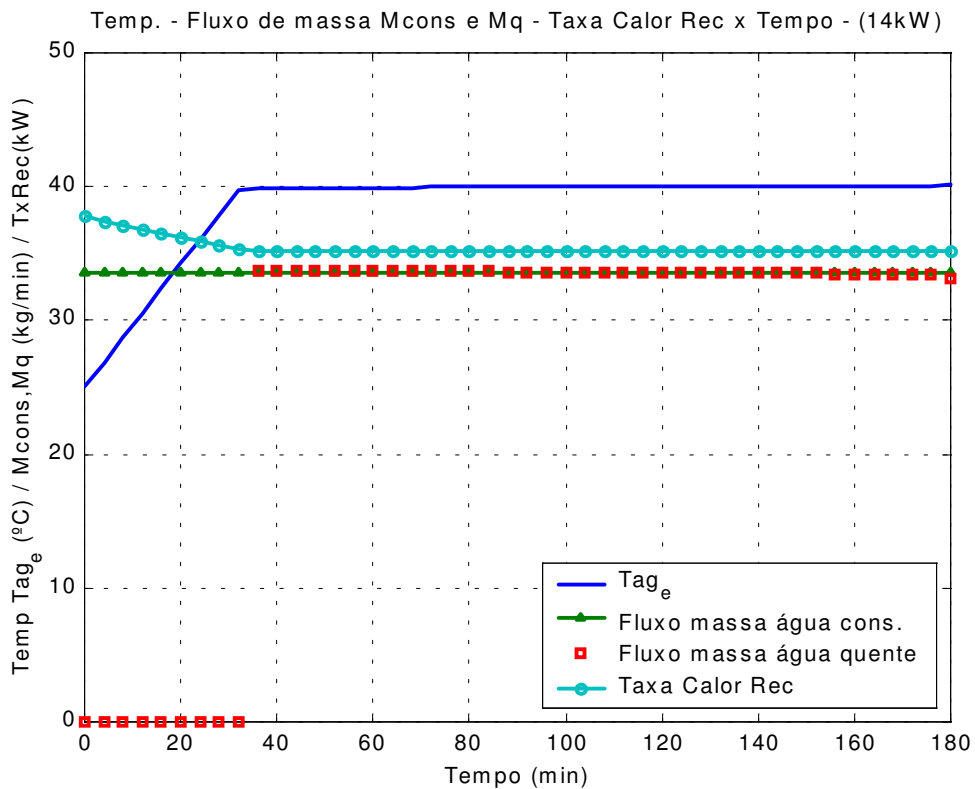
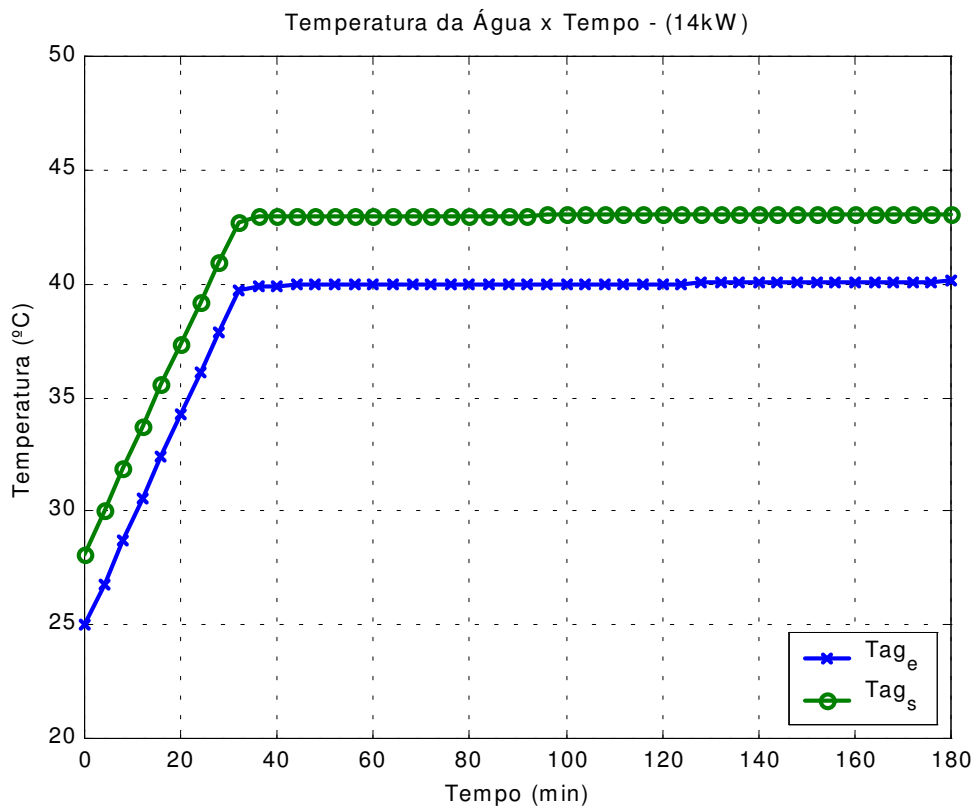
Apêndice 13

Cogeração: Simulação numérica – 1º Caso - FI 2/4



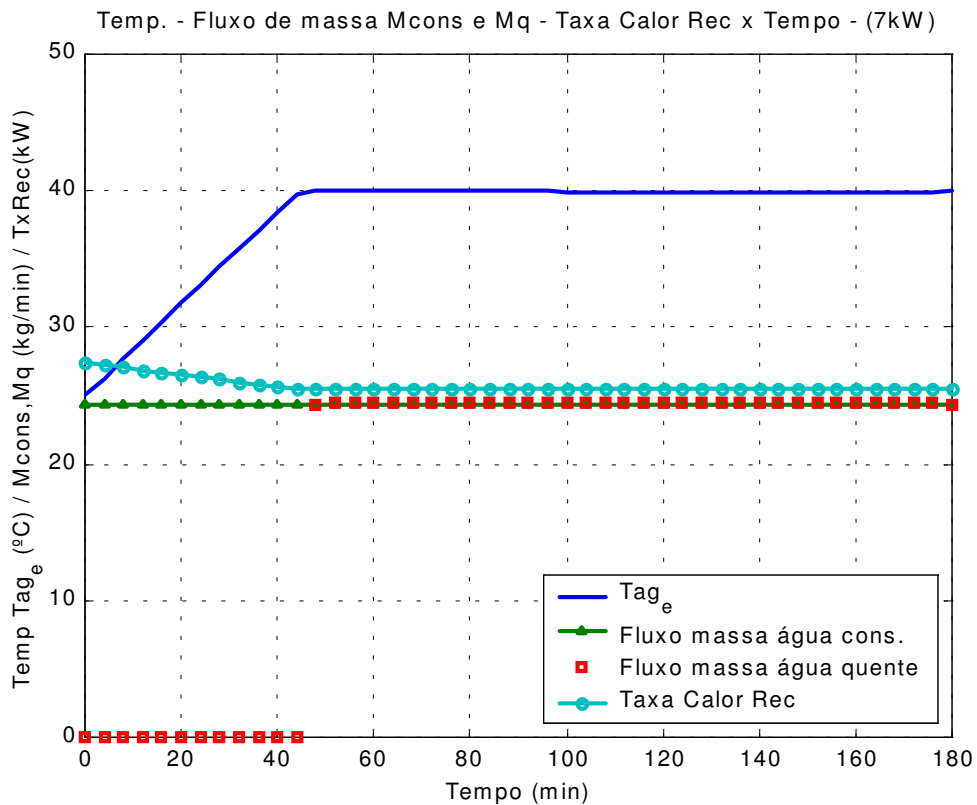
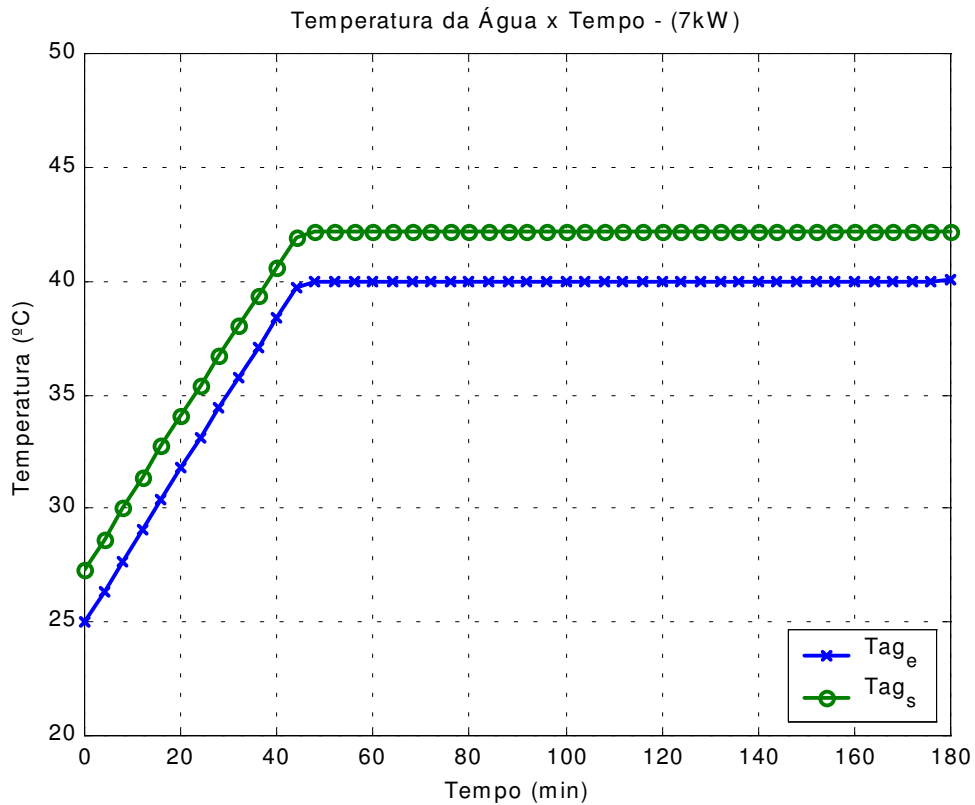
Apêndice 13

Cogeração: Simulação numérica – 1º Caso - FI 3/4



Apêndice 13

Cogeração: Simulação numérica – 1º Caso - FI 4/4



Anexo 1

FI 1/2

Microturbina C30 – Especificações técnicas

Especificações da Microturbina Capstone C30 (Recuperada) LPNG
Dados baseados para pressão de entrada de 5 PSIG
Fonte: Capstone Turbine Corporation - Condições ISO

Dimensões	Largura	714 mm
	Profundidade	1344 mm
	Altura	1900 mm
Peso	Microturbina + bateria	578 kg
Entrada elétrica	Energia elétrica (“startup”) Comunicação	Rede elétrica – PUC-Rio Porta serial DB9 RS-232
Saída elétrica	Potência	30 kW, 360-528 AC 50/60 Hz, 3 fases
Nível de ruído	Modelo C30 (“Standard Package”)	65 dBA a 10m
Pressão do gás (fornecimento)	Com compressor de gás natural	5 a 15 psig
Desempenho (carga máxima)	Potência de saída	28,0 (+0/-1) kW, 360-528 AC
	Eficiência	25,0 (± 2) % (PCI)
	“Heat Input”	444000 kJ/h (PCS)
	“Heat Input” “Heat Rate”	404000 kJ/h (PCI) 14400 kJ/kWh (PCI)
Gases (exaustão) (carga máxima)	Temperatura de exaustão	275°C
	Energia térmica na exaustão	327000 kJ/h
	Fluxo de massa na exaustão	0,31 kg/s
Emissões (carga máxima)	Óxido de nitrogênio (NOx)	< 9 ppmv à 15% O2
	Monóxido de carbono (CO)	< 40 ppmv à 15% O2
	Total de hidrocarboneto (THC)	< 9 ppmv à 15% O2

Anexo 1

FI 2/2

Microturbina C30 – Especificações técnicas

Descrição	Operação
Faixa de operação (tensão)	360 – 528 VCA (somente 3 fases)
Conexão para a tensão de saída	3 fios elétricos, L1, L2 e L3
Impedância máxima da rede	≤ 10% Indutivo, (2 mH) ≤ 5% Resistivo (0,4 ohms) Zbase = 7,67 ohms linha - neutro
Defasagem de fase (tensão)	120 (±1) graus
Faixa de aquisição da frequência	45 – 65 Hz. Auto-sincronização. A microturbina detecta a forma de onda da rede e se sincroniza em fase e frequência antes de realizar a conexão com a rede elétrica local
Potência de Saída (Condições ISO)	0 – 28 kW
Corrente de Saída	46 A RMS, máximo em regime contínuo
Harmônico (saída)	Em concordância com IEEE 519, <5% THD
Potência requerida da rede para o arranque da microturbina	3,5 kW (pico)
Potência requerida da rede para o resfriamento e desligamento da microturbina	2,8 kW pico, 0,147 kWh, 5 minutos, típico
Potência para “Stand-by”	0,5 kW

Anexo 2

Especificações técnicas:

Unidade recuperadora de calor (URC)

Reservatório térmico (Boiler)

Especificações da Unidade recuperadora de calor modelo ITC1
Fonte: Conuar S.A.

Dimensões	Largura	800 mm
	Profundidade	1025 mm
	Altura	1745 mm
Peso		500 kg
Parte elétrica	Tensão de alimentação	3 fases x 220V – 60 Hz
	Potência da bomba	1,5 kW (2 HP)
Operação	Temperatura máxima de saída da água	95°C
	Fluido de trabalho	Água

Especificações do Reservatório térmico (Boiler)
Fonte: BR Solar

Dimensões	Diâmetro	675 mm
	Profundidade	3460 mm
Parte elétrica	Tensão de alimentação	2 fases x 220V – 60 Hz
Capacidade	Volumétrica (nominal)	1000 litros
	Pressão interna	40 mca
	Potência (Apoio elétrico)	5000 W
Estrutura	Revestimento externo	Alumínio
	Corpo interno	Aço inoxidável AISI 304
	Tubulações	Aço inoxidável
	Isolamento térmico	Poliuretano expandido (50mm)

Anexo 3

Método numérico – Método de Runge-Kutta

Sabe-se que para os problemas de condição inicial com equações de primeira ordem tem-se como fato importante o seguinte:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad \text{Eq. (A3.1)}$$

Na seguinte condição inicial:

$$y(t_0) = y_0 \quad \text{Eq. (A3.2)}$$

Sabe-se também que através do método de Euler ou método da Reta Tangente é possível explicitar o valor da solução “y” pela seguinte equação:

$$y_{n+1} = y_n + f(t_n, y_n)(t_{n+1} - t_n) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Eq. (A3.3)}$$

Através da equação acima, obtém-se um resultado aproximado da solução a cada passo, que servirá para calcular um novo resultado com o próximo passo.

De forma análoga ao método de Euler o método clássico de Runge-Kutta é equacionado utilizando-se uma média ponderada de valores de $f(t, y)$, em pontos diferentes no intervalo $t_n \leq t \leq t_{n+1}$, (Boyce, [22]). Considerando um passo uniforme, $h = t_{n+1} - t_n$, tem-se o seguinte:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_{n1} + 2k_{n2} + 2k_{n3} + k_{n4}) \quad \text{Eq. (A3.4)}$$

Onde:

$$k_{n1} = f(t_n, y_n) \quad \text{Eq. (A3.5)}$$

$$k_{n2} = f\left(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_{n1}\right) \quad \text{Eq. (A3.6)}$$

$$k_{n3} = f\left(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_{n2}\right) \quad \text{Eq. (A3.7)}$$

$$k_{n4} = f(t_n + h, y_n + hk_{n3}) \quad \text{Eq. (A3.8)}$$

Segundo ainda Boyce [22], a soma $h(k_{n1} + 2k_{n2} + 2k_{n3} + k_{n4})/6$ também pode ser interpretada como um coeficiente angular médio.

O erro de truncamento local deste método em relação à variação do passo, h , é proporcional a ordem de h^5 .

Anexo 4

Calor específico à pressão constante de vários gases perfeitos em função da temperatura.

Tabela 1: $c_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ kJ/kg K - $\theta = T(\text{Kelvin})/1000$

Gás	Fórmula	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	Intervalo K
Metano	CH ₄	1,200	3,250	0,750	-0,710	250 - 1200
Etano	C ₂ H ₆	0,180	5,920	-2,310	0,290	250 - 1200
Propano	C ₃ H ₈	-0,096	6,950	-3,600	0,730	250 - 1200
Oxigênio	O ₂	0,880	-0,0001	0,540	-0,330	250 - 1200
Nitrogênio	N ₂	1,110	-0,480	0,960	-0,420	250 - 1200
Dióxido de carbono	CO ₂	0,450	1,670	-1,270	0,390	250 - 1200
Monóxido de carbono	CO	1,100	-0,460	1,000	-0,454	250 - 1200
Ar	-	1,050	-0,365	0,850	-0,390	250 - 1200
Água (vapor)	H ₂ O	1,790	0,107	0,586	-0,200	250 - 1200

Fonte: Tabela A.6 - Fundamentos da Termodinâmica - van Wylen 6ª edição - Pg 522

Tabela 2: $c_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ kJ/kmol K - $\theta ==>$ Kelvin

Iso-butano	i C ₄ H ₁₀	-7,913E+00	4,160E-01	-2,301E-04	4,991E-08	273 - 1500
Butano normal	n C ₄ H ₁₀	3,960E+00	3,715E-01	-1,834E-04	3,500E-08	273 - 1500
Iso-pentano	i C ₅ H ₁₂	6,774E+00	4,543E-01	-2,246E-04	4,229E-08	273 - 1500
Pentano normal	n C ₅ H ₁₂	6,774E+00	4,543E-01	-2,246E-04	4,229E-08	273 - 1500
Hexano	C ₆ H ₁₄	6,938E+00	5,522E-01	-2,865E-04	5,769E-08	273 - 1500

Fonte: Tabela A-7M - Engineering Thermodynamics - Jui Sheng Hsieh - Pg 758

Anexo 5

Valores de t-student para diferentes níveis de confiabilidade

Grau de liberdade ν $\nu_i = n_i - 1$	Nível de confiabilidade		
	68,27%	95,45%	99,73%
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
6	1,09	2,52	4,90
7	1,08	2,43	4,53
8	1,07	2,37	4,28
9	1,06	2,32	4,09
10	1,05	2,28	3,96
15	1,03	2,18	3,59
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33
30	1,02	2,09	3,27
40	1,01	2,06	3,20
50	1,01	2,05	3,16
∞	1,00	2,00	3,00