

4 Resultados

O objetivo do presente trabalho é modelar um sistema de refrigeração de grande porte, e obter suas condições de funcionamento ótimo (menores custos de investimento e de consumo). Utilizou-se os programas aqui desenvolvidos para determinar as características de funcionamento dos componentes do sistema de refrigeração com termoacumulação para o bloco “D” do prédio Cardeal Leme da PUC – Rio. A distribuição de temperaturas em um dia típico estão dadas no apêndice 7.1 e 7.2, respectivamente.

Assim, considerando as variações de carga e de temperatura horárias, determinou-se:

1) Os parâmetros característicos do chiller adequado, trabalhando à carga nominal, segundo os dados do fabricante (TRANE) e as recomendações achadas na bibliografia revisada, realizando para isto uma análise de sensibilidade de seus parâmetros, com o programa N° 1.1.

2) O consumo horário de energia do sistema quando o chiller acompanha a carga térmica, usando o programa N° 1.2.

3) O consumo de energia do sistema quando nele se incorpora um tanque de armazenamento, nos casos de termoacumulação (Casos 2 e 3), onde se apresentam quatro modos de operação. Para estes casos utilizou-se os programas: N° 2.1, 2.2, 2.3 (no modo 2 não há consumo de energia).

Já que os programas indicados incluem como dado de entrada a capacidade do chiller usa-se o programa N° 3 para sua determinação. Em seguida, com os dados do consumo, e usando uma planilha Excel, obtêm-se os custos decorrentes do consumo horário. Estes resultados são então comparados com os obtidos usando o programa N° 1.2, quando o chiller opera acompanhando a carga.

A análise comparativa de todos os casos foi realizada para as mesmas condições de carga, comparando as tarifas verde e azul da Light (anexo 7.4).

4.1. Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do chiller

Considerando que a eficiência do compressor “ η_{cp} ” é o produto de suas eficiências mecânica e adiabática, e que $0,70 < \eta_{cp} < 0,90$ (Rodriguez, 1973), foram testados um conjunto de valores destas com o objetivo de obter um valor da capacidade nominal e do consumo nominal do chiller, os quais são apresentados na tabela N° 3.

Tabela 3- Eficiência do compressor

Eficiência	(%)
Mecânica	95
Adiabática	80
Do compressor	76

Com os valores apresentados na tabela 3, executou-se o programa N° 1.1 determinando o valor de cada um dos parâmetros que permita melhor reproduzir o comportamento do chiller TRANE - modelo RTHB 215 (Capacidade 200TR, consumo = 142,2 kW). Neste processo a eficiência da torre de resfriamento, n_{torre} , foi mantida constante, e igual a 0,60 (Goribar, 1973). Assim determinou-se, que:

- a condutância global do evaporador é : $UA_{ev} = 170,55 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$,
- a condutância global do condensador é : $UA_{cd} = 81,21 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$,
- a eficiência adiabática: $\eta_k = 0.95$,
- a eficiência mecânica do compressor $\eta_m = 0.80$,
- a eficiência do compressor $\eta_{cp} = 0.75$.

Desta forma se dimensionou-se os tamanhos dos trocadores de calor a partir de suas condutâncias térmicas globais UA, as quais serão mantidas constantes para o cálculo do consumo do chiller a cargas parciais.

Considerando as condições estabelecidas para realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros do chiller, as que foram descritas no capítulo 3, temos:

- 1) Que o consumo de energia varia com a eficiência adiabática como se mostra na figura 42, onde o consumo nominal foi calculado para $\eta_k = 0,95$.

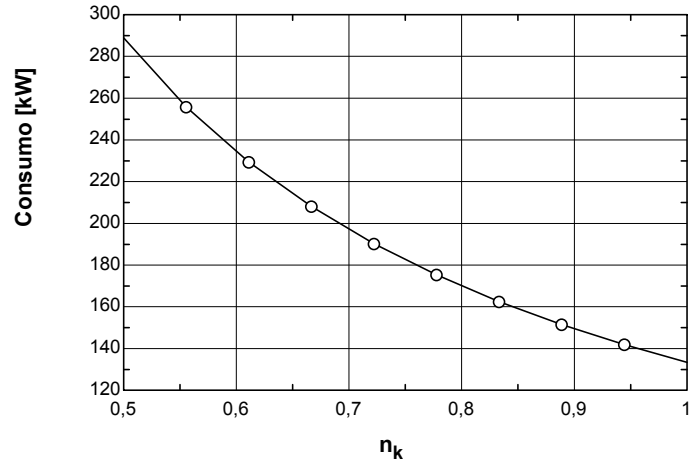


Figura 42- Consumo do compressor vs eficiência adiabática do compressor.

- 2) Que o consumo varia com a eficiência mecânica segundo a figura 43 e, sendo o consumo nominal fixado para $\eta_m = 0,80$.

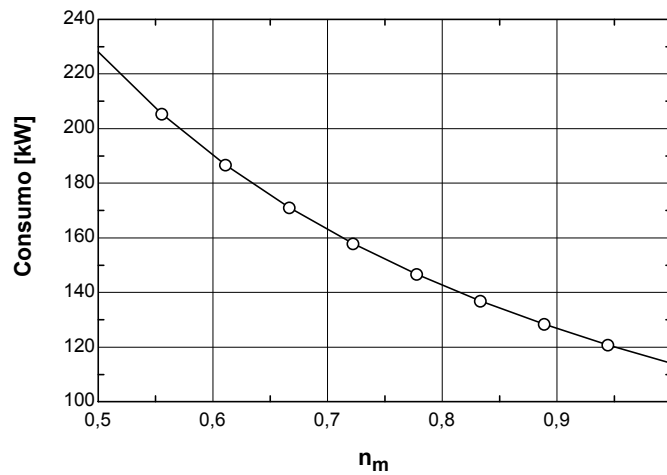


Figura 43- Consumo do compressor vs eficiência mecânica do compressor.

- 3) Que o consumo varia com a eficiência da torre de resfriamento, como apresentado na figura 44 onde, para eficiências maiores que 0,60, verifica-se que o consumo não muda muito, muito embora a custo maior.

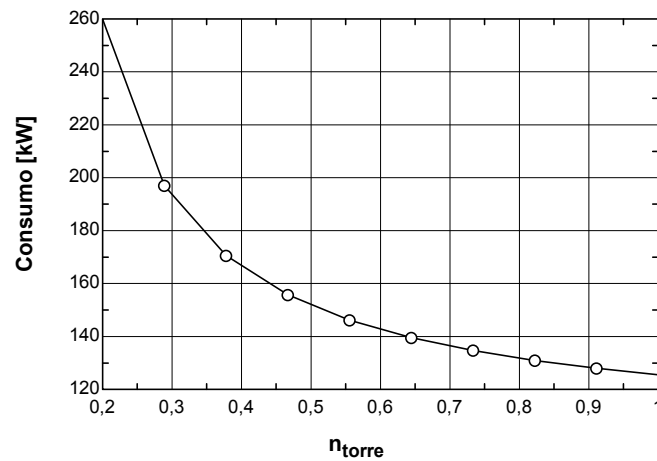


Figura 44- Consumo do compressor vs eficiência da torre de resfriamento.

- 4) Que o consumo varia com a efetividade, como se mostra na figura 45. O consumo nominal foi obtido para uma efetividade do evaporador $\varepsilon_{ev} = 0,80$.

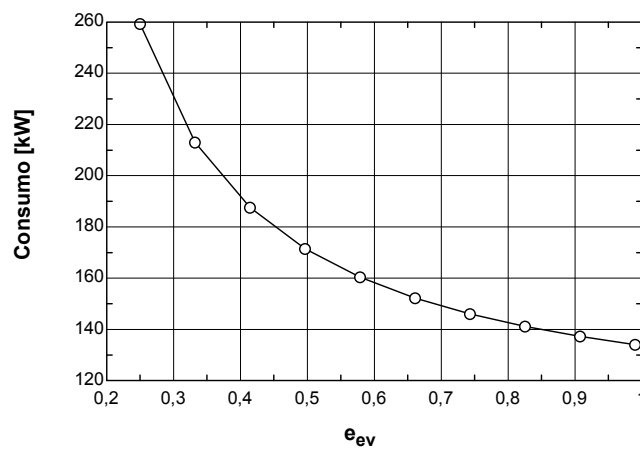


Figura 45- Consumo do compressor vs efetividade do evaporador

- 5) Que o consumo varia com a efetividade do condensador como apresentado na figura 46. A capacidade nominal foi obtida para uma efetividade $\varepsilon_{cd} = 0,40$.

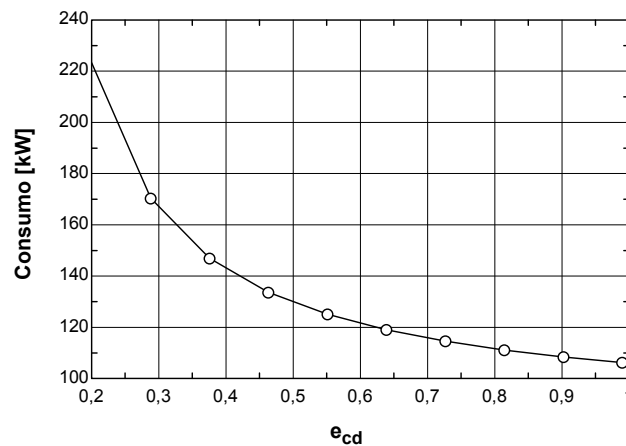


Figura 46- Consumo do compressor vs efetividade do condensador

- 6) Que o COP do chiller para uma temperatura de condensação constante, muda com a temperatura de evaporação como mostrado na figura 47. Para temperatura de evaporação $T_{ev} = 7,2$ (dado de entrada do modelo) o COP é igual a 5,2.

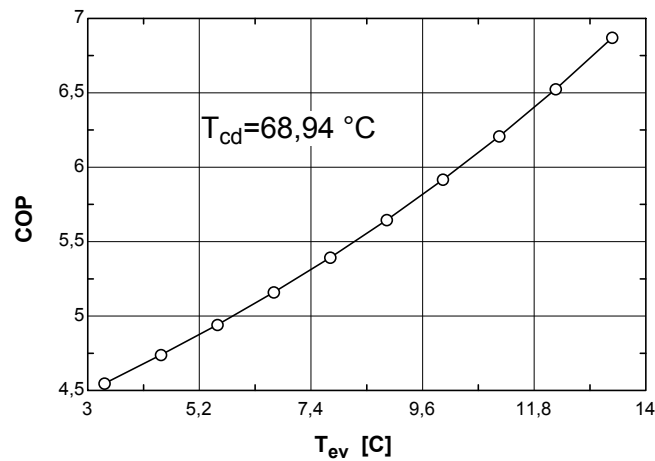


Figura 47- Coeficiente de desempenho vs a temperatura de evaporação.

- 7) Que o COP do chiller, para uma temperatura de evaporação constante, muda com a temperatura de evaporação como se mostra na seguinte figura. Para um COP = 5,2, a temperatura de condensação é $T_{cd} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

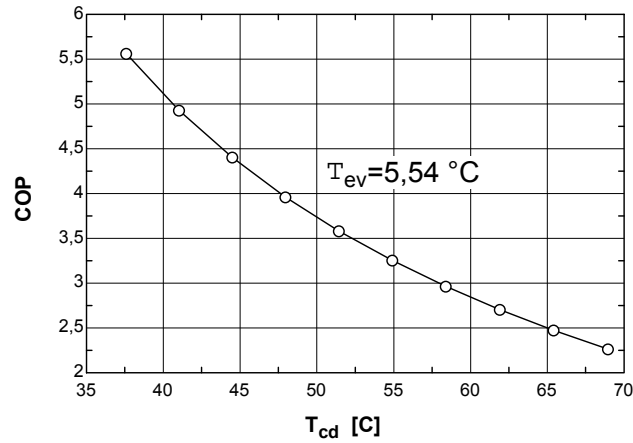


Figura 48- Coeficiente de desempenho vs Temperatura de condensação

- 8) Que a temperatura da água na saída do evaporador do chiller, T_5 , é controlada pela vazão mássica da água, \dot{m}_a , assim como a temperatura da água na saída do condensador, T_{16} , é controlada pela vazão mássica da água \dot{m}_c , figuras 49 e 50.

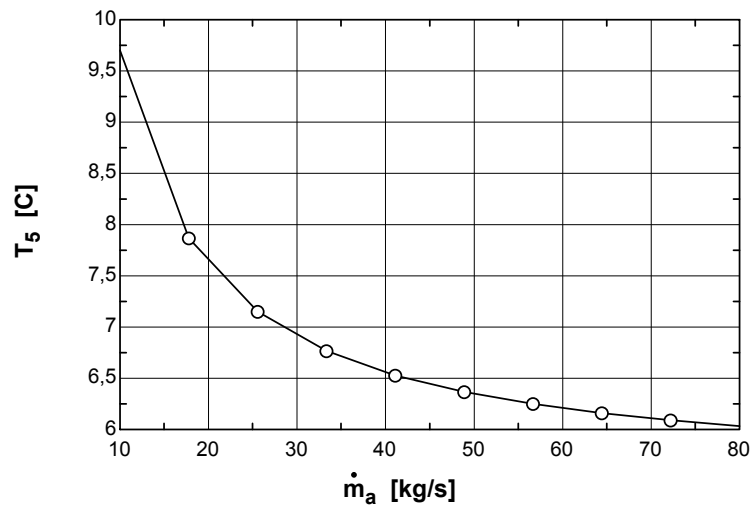


Figura 49- Temperatura da água na saída do evaporador vs vazão mássica da água no evaporador

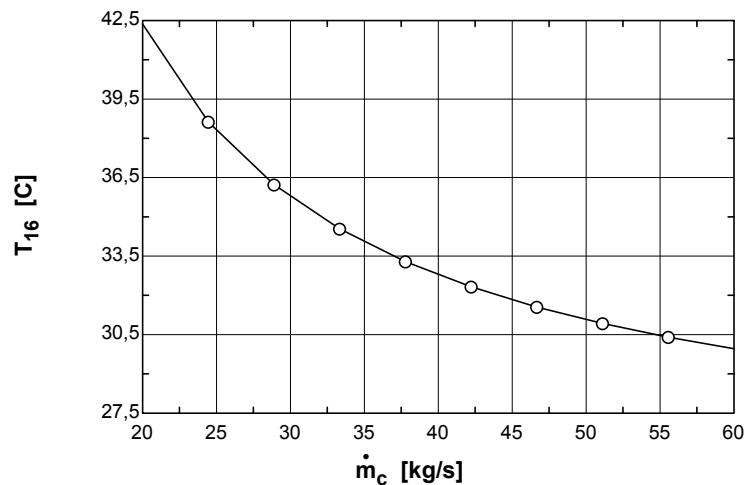


Figura 50- Temperatura da água na saída do condensador vs vazão mássica da água no condensador.

4.2.

Resultados da simulação propriamente dita

Os resultados anteriores foram obtidos como uma solução de um problema inverso. Com estes dados foram obtidas as curvas de comportamento do chiller a cargas parciais, conforme a seguir:

- 1) A figura 51 apresenta as curvas do COP previsto pelo modelo e do fabricante (TRANE) onde é observado o grau de aproximação do modelo com respeito à informação do fabricante do chiller, quando o chiller opera atendendo a carga no período de 7 a 23 horas. As diferenças observadas são inferiores a 5%.

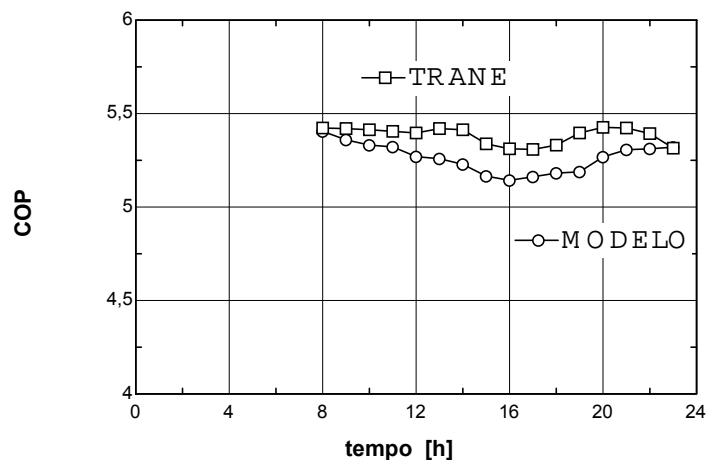


Figura 1- Variação do coeficiente de desempenho do chiller no período de 7 a 23 horas.

2) A figura 5.2 apresenta as curvas do consumo previsto pelo modelo e do chiller TRANE ficam muito próximos, sendo o erro inferior a 5 % ao longo do período de operação.

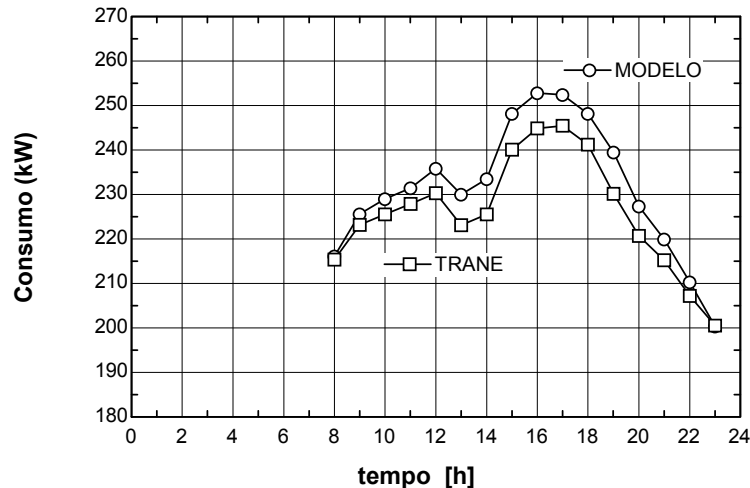


Figura 2- Variação do consumo do chiller no período de 7 a 23 horas.

3) As curvas que mostram a influência da temperatura do meio ambiente e da carga térmica no consumo de energia do chiller são obtidas a partir dos resultados obtidos com o programa N° 1.2, os quais são mostrados na seguinte tabela, para uma eficiência de torre fixa de 60%.

Tabela 4- Consumo de energia em função da temperatura do meio ambiente e da carga térmica.

Q _T (kW)	T _{amb}				
	22	27	32	37	42
500	85,54	90,64	95,56	100,3	104,9
750	155,3	155,7	156,1	156,5	156,9
1000	192,9	195,7	198,5	201,1	203,7
1250	245,9	251,6	257	262,3	267,4
1500	310,6	311,5	312,3	313,1	313,9
1750	350,5	353,8	357	360,1	363,1
2000	406,9	413,2	419,2	425	430,6
2250	466,2	467,5	468,8	470	471,1
2500	508,7	512,5	516,2	519,8	523,2
2750	568,7	575,5	582,1	588,4	594,6
3000	622,2	623,9	625,6	627,2	628,7
3250	667,5	671,8	676	680	683,9
3500	731,2	738,6	745,8	752,7	759,4
3750	778,5	780,7	782,8	784,9	786,8
4000	826,9	831,8	836,5	841	845,4
4250	898,6	898,9	899,1	899,3	899,6
4500	935,4	938	940,6	943,1	945,4
4750	987	992,4	997,6	1003	1007
5000	1054	1055	1055	1056	1056

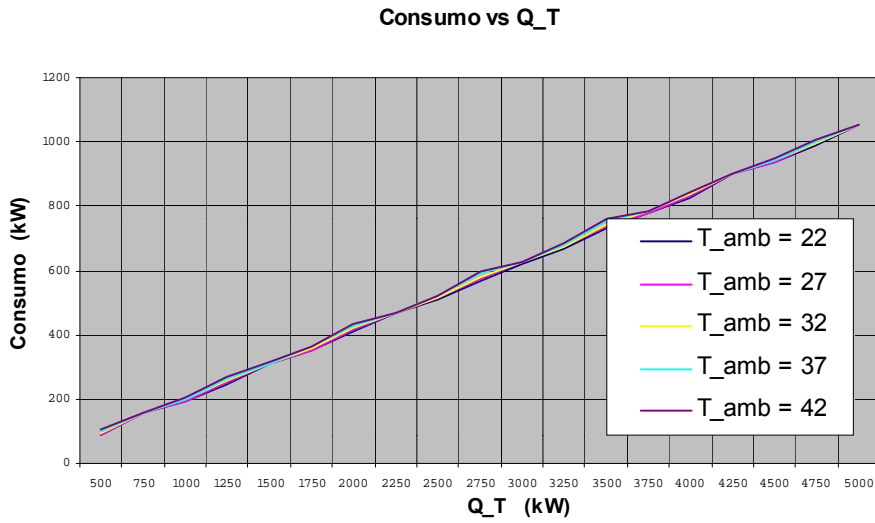


Figura 53- Consumo do chiller vs a carga térmica do prédio.

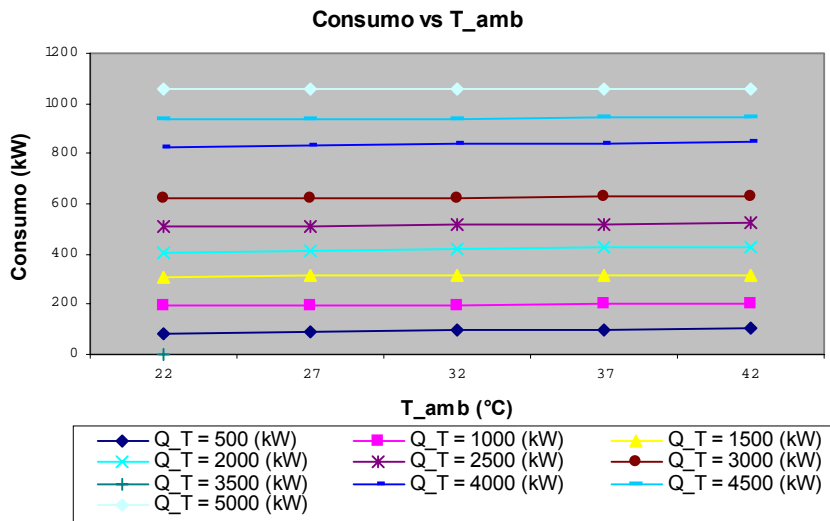


Figura 3- Consumo do chiller vs a temperatura do meio ambiente.

4.3. Análise de custo das alternativas

Nesta parte do trabalho utiliza-se o modelo desenvolvido para analisar a melhor alternativa para o sistema de condicionamento de ar do bloco “D” do prédio Cardeal Leme da PUC Rio.

A determinação do sistema compreende uma análise comparativa das seguintes três alternativas de operação propostas para o sistema:

- 1) O chiller acompanha a carga (sem termoacumulação) (Caso 1)
- 2) O chiller opera em regime de carga constante com termoacumulação e permanece ligado no período de ponta (Caso 2)
- 3) O chiller opera em regime de carga constante com termoacumulação como no caso 2, mas desligado no período de ponta (Caso 3)

Em cada caso consideram-se as variações da temperatura do meio ambiente ao longo do dia (transiente horário), em concordância com o diagrama de carga térmica do estudo feito para a PUC no ano 2002 do mês de Fevereiro (ver apêndice: 7.1, 7.2).

Determinados os custos de operação horários e totais de cada alternativa faz-se uma análise dos custos dos equipamentos, que envolve basicamente o custo do chiller e do tanque de armazenamento.

Considerando que o custo de operação é a soma dos custos devido ao consumo de energia e da demanda elétrica contratada, e que o custo de investimento ou de capital inclui a compra, instalação e manutenção do sistema e o custo de manutenção anual, determina-se a alternativa de menor custo global.

4.3.1. Determinação da alternativa de menor custo de operação

Usando os dados da carga térmica e da distribuição de temperaturas no dia típico (14 de Fevereiro 2002), executamos o programa N° 1.2, considerando como tipo de tarifa, a contratada pela PUC, cujo tipo de fornecimento pode ser:

- a) HORO – SAZONAL – AZUL Subgrupo: A4. (da empresa Ligth Serviços de Eletricidade S.A.), indicada a seguir:

Tabela 5- Demanda tarifa azul do quadro B da Light (Apêndice 7.4)

Segmento Horário Subgrupo	Demanda (R\$/kW)	
	A4 (2.3 a 25kV)	Ponta
24,26		8,05

Tabela 6- Consumo tarifa azul do quadro C da Light (Apêndice 7.4)

Segmento Horário Subgrupo	Consumo (R\$/kW)			
	A4 (2.3 ate 25kV)	Ponta		Fora de Ponta
Seca		Úmida	Seca	Úmida
159,20		147,29	75,68	66,89

b) HORO – SAZONAL – VERDE Subgrupo: A4 (da empresa Ligth Serviços de Eletricidade S.A.), indicada a continuação:

Tabela 7- - Demanda tarifa verde do quadro E da Light (Apêndice 7.4)

Segmento Horário Subgrupo	Demanda (R\$/kW)	
	A4(2.3 a 25kV)	Ponta
7,79		0,00

Tabela 8- Consumo tarifa verde do quadro C da Light (Apêndice 7.4)

Segmento Horário Subgrupo	Consumo (R\$/kW)			
	A4 (2.3 a 25kV)	Ponta		Fora de Ponta
Seca		Úmida	Seca	Úmida
720,29		708,49	79,22	69,99

Já que para determinar os consumos de energia nos casos 2 e 3 deve-se obter primeiro a capacidade do chiller, fazemos este cálculo usando o programa Nº 3. Assim também, para determinar o consumo em cada caso, terá que executam-se os programas 2.1, 2.2, 2.3. Todos estes resultados são apresentados nas seguintes tabelas.

Tabela 9- Custos de energia horária e total para o caso 1 – tarifa azul

Horario	Hora	Caso 1: O chiller acompanha a Carga Térmica		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
Fora da Ponta	0--1	0.0	0.0	0.00
	1--2	0.0	0.0	0.00
	2--3	0.0	0.0	0.00
	3--4	0.0	0.0	0.00
	4--5	0.0	0.0	0.00
	5--6	0.0	0.0	0.00
	6--7	0.0	0.0	0.00
	7--8	1042.0	216.1	14.45
	8--9	1095.0	225.6	15.09
	9--10	1140.0	229.0	15.32
	10--11	1179.0	231.5	15.49
	11--12	1211.0	235.8	15.77
	12--13	1236.0	230.0	15.38
	13--14	1253.0	233.5	15.62
	14--15	1264.0	248.2	16.60
	15--16	1267.0	252.8	16.91
	16--17	1264.0	252.4	16.88
17--18	1253.0	248.2	16.60	
Ponta	18--19	1236.0	239.4	35.26
	19--20	1211.0	227.4	33.49
	20--21	11079.0	219.9	32.39
F. de Ponta	21--22	1140.0	210.3	14.07
	22--23	1095.0	200.4	13.40
	23--24	0.0	0.0	0.00
Valores totais	Fora da Ponta		3013.8	Kw - h
	Ponta		686.7	Kw - h
	Total		3700.5	Kw - h
Custos totais	Consumo total diario			302.74
	Consumo total mensal			9109.46
	Demanda Ponta		R\$	7278.00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	2415.00
	Pago Mensal		R\$	18802.46

Demanda máxima Fora de Ponta	300 KW
Demanda máxima na Ponta	300 KW

Tabela 10- Custos de energia horária e total para o caso 1- tarifa verde

Horario	Hora	Caso 1: O chiller acompanha a Carga Térmica		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
Fora da Ponta	0--1	0.0	0.0	0.00
	1--2	0.0	0.0	0.00
	2--3	0.0	0.0	0.00
	3--4	0.0	0.0	0.00
	4--5	0.0	0.0	0.00
	5--6	0.0	0.0	0.00
	6--7	0.0	0.0	0.00
	7--8	1042.0	216.1	14.45
	8--9	1095.0	225.6	15.09
	9--10	1140.0	229.0	15.32
	10--11	1179.0	231.5	15.49
	11--12	1211.0	235.8	15.77
	12--13	1236.0	230.0	15.38
	13--14	1253.0	233.5	15.62
	14--15	1264.0	248.2	16.60
	15--16	1267.0	252.8	16.91
	16--17	1264.0	252.4	16.88
	17--18	1253.0	248.2	16.60
Ponta	18--19	1236.0	239.4	169.61
	19--20	1211.0	227.4	161.11
	20--21	1179.0	219.9	155.80
F. de Ponta	21--22	1140.0	210.3	14.07
	22--23	1095.0	200.4	13.40
	23--24	0.0	0.0	0.00
Valores totais de consumo	Fora da Ponta		3013.8	kW- h
	Ponta		686.7	kW-h
	Total		3700.5	kW-h
Custos totais	Consumo total diario		R\$	688.11
	Consumo total mensal		R\$	20643.39
	Demanda Ponta		R\$	2415.00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	0.00
	Pago Mensal		R\$	23058.39

Demanda máxima Fora de Ponta	300 kW
Demanda máxima na Ponta	300 kW

Para os casos 2 e 3, usando o programa N° 3, obtêm-se a capacidade do chiller que são os dados de entrada para executar os programas N° 2.1, 2.2, 2.3 para obter o consumo de energia do chiller operando nos modos indicados nas tabelas 11 e 14. Assim temos:

Tabela 11- Determinação do modo de operação para o cálculo do consumo no caso 2

Hrario	CAP_ch2 (kW)	Q_t (kW-h)	Qt/CAP_ch2	Modo	Consumo kW-h
0--1	796,1	0,0	0,00	3	158,1
1--2	796,1	0,0	0,00	3	158,1
2--3	796,1	0,0	0,00	3	154,8
3--4	796,1	0,0	0,00	3	154,8
4--5	796,1	0,0	0,00	3	154,8
5--6	796,1	0,0	0,00	3	154,8
6--7	796,1	0,0	0,00	3	154,8
7--8	796,1	1113	1,40	4	151,5
8--9	796,1	1152	1,45	4	151,7
9--10	796,1	1163	1,46	4	152,9
10--11	796,1	1173	1,47	4	152,5
11--12	796,1	1184	1,49	4	155,3
12--13	796,1	1152	1,45	4	159,6
13--14	796,1	1163	1,46	4	160,8
14--15	796,1	1221	1,53	4	158,7
15--16	796,1	1238	1,56	4	158,1
16--17	796,1	1241	1,56	4	156,5
17--18	796,1	1225	1,54	4	157
18--19	796,1	1183	1,49	4	161,6
19--20	796,1	1141	1,43	4	160
20--21	796,1	1112	1,40	4	159,6
21--22	796,1	1064	1,34	4	163,3
22--23	796,1	1015	1,28	4	165,6
23--24	796,1	0,0	0,00	3	168,0

Tabela 1- Custos de energia horária e total para o caso 2- tarifa azul

Horario	Hora	Caso 2: O chiller opera 24 h		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
Fora de Ponta	0--1	0,0	158,1	10,58
	1--2	0,0	158,1	10,58
	2--3	0,0	154,8	10,35
	3--4	0,0	154,8	10,35
	4--5	0,0	154,8	10,35
	5--6	0,0	154,8	10,35
	6--7	0,0	154,8	10,35
	7--8	1113	151,5	10,13
	8--9	1152	151,7	10,15
	9--10	1163	152,9	10,23
	10--11	1173	152,5	10,20
	11--12	1184	155,3	10,39
	12--13	1152	159,6	10,68
	13--14	1163	160,8	10,76
	14--15	1221	158,7	10,62
	15--16	1238	158,1	10,58
	16--17	1241	156,5	10,47
17--18	1225	157	10,50	
Ponta	18--19	1183	161,6	23,80
	19--20	1141	160	23,57
	20--21	1112	159,6	23,51
F. de Ponta	21--22	1064	163,3	10,92
	22--23	1015	165,6	11,08
	23--24	0,0	168,0	11,24
Valores totales	Fora da Ponta		2211,5	Kw - h
	Ponta		481,2	Kw - h
	Total		2692,7	Kw - h
Custos totais	Consumo total diario		R\$	291,71
	Consumo total mensal		R\$	8769,65
	Demanda Ponta		R\$	4852,00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	1610,00
	Pago Mensal		R\$	15231,65

Demanda máxima Fora de Ponta 200 KW

Demanda máxima na Ponta 200 KW

Tabela 2- Custos de energia horária e total para o caso 2- tarifa verde

Horario	Hora	Caso 2: O chiller opera 24 h		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
FORA DA PONTA	0--1	0,0	158,1	10,58
	1--2	0,0	158,1	10,58
	2--3	0,0	154,8	10,35
	3--4	0,0	154,8	10,35
	4--5	0,0	154,8	10,35
	5--6	0,0	154,8	10,35
	6--7	0,0	154,8	10,35
	7--8	1042,0	151,5	10,13
	8--9	1095,0	151,7	10,15
	9--10	1140,0	152,9	10,23
	10--11	1179,0	152,5	10,20
	11--12	1211,0	155,3	10,39
	12--13	1236,0	159,6	10,68
	13--14	1253,0	160,8	10,76
	14--15	1264,0	158,7	10,62
	15--16	1267,0	158,1	10,58
	16--17	1264,0	156,5	10,47
17--18	1253,0	157	10,50	
Ponta	18--19	1236,0	161,6	114,49
	19--20	1211,0	160	113,36
	20--21	1179,0	159,6	113,08
F. de Ponta	21--22	1140,0	163,3	10,92
	22--23	1095,0	165,6	11,08
	23--24	0,0	168,0	11,24
Valores totales de consumo	Fora da Ponta		2211,5	kW- h
	Ponta		481,2	kW-h
	Total		2692,7	kW-h
Custos totais	Consumo total diario		R\$	561,76
	Consumo total mensal		R\$	16852,90
	Demanda Ponta		R\$	1610,00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	0,00
	Pago Mensal		R\$	18462,90

Demanda máxima Fora de Ponta	200 kW
Demanda máxima na Ponta	200 kW

Tabela 3- Determinação do modo de operação para o calculo do consumo no caso 3

Horario	Carga Térmica (kW)	Q_t (kh-h)	Qt/CAP_ch3	Modo	Consumo kW-h
0-1	910,6	0,0	0,00	3	196,43
1-2	910,6	0,0	0,00	3	196,43
2-3	910,6	0,0	0,00	3	192,4
3-4	910,6	0,0	0,00	3	192,4
4-5	910,6	0,0	0,00	3	192,4
5-6	910,6	0,0	0,00	3	192,4
6-7	910,6	0,0	0,00	3	192,4
7-8	910,6	1042,0	1,14	4	196,1
8-9	910,6	1095,0	1,20	4	195,9
9-10	910,6	1140,0	1,25	4	197,3
10-11	910,6	1179,0	1,29	4	196,8
11-12	910,6	1211,0	1,33	4	200,1
12-13	910,6	1236,0	1,36	4	205,6
13-14	910,6	1253,0	1,38	4	206,9
14-15	910,6	1264,0	1,39	4	204
15-16	910,6	1267,0	1,39	4	203,2
16-17	910,6	1264,0	1,39	4	201,2
17-18	910,6	1253,0	1,38	4	202
18-19		1236,0	Chiller desligado	2	0,00
19-20		1211,0	Chiller desligado	2	0,00
20-21		1179,0	Chiller desligado	2	0,00
21-22	910,6	1140,0	1,25	4	210,7
22-23	910,6	1095,0	1,20	4	214
23-24	910,6	0,0	0,00	3	208,21

Tabela 4- Custos de energia horária e total para o caso 3- tarifa azul

Horario	Hora	Caso 3: O chiller opera 21h (esta desligado na ponta)		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
Fora da Ponta	0-1	0,0	196,43	13,14
	1-2	0,0	196,43	13,14
	2-3	0,0	192,4	12,87
	3-4	0,0	192,4	12,87
	4-5	0,0	192,4	12,87
	5-6	0,0	192,4	12,87
	6-7	0,0	192,4	12,87
	7-8	1042,0	196,1	13,12
	8-9	1095,0	195,9	13,10
	9-10	1140,0	197,3	13,20
	10-11	1179,0	196,8	13,16
	11-12	1211,0	200,1	13,38
	12-13	1236,0	205,6	13,75
	13-14	1253,0	206,9	13,84
	14-15	1264,0	204	13,65
	15-16	1267,0	203,2	13,59
	16-17	1264,0	201,2	13,46
17-18	1253,0	202	13,51	
Ponta	18-19	1236,0	0,00	0,00
	19-20	1211,0	0,00	0,00
	20-21	11079,0	0,00	0,00
F. de Ponta	21-22	1140,0	210,7	14,09
	22-23	1095,0	214	14,31
	23-24	0,0	208,21	13,93
Valores totales	Fora da Ponta		2842,0	Kw - h
	Ponta		0,0	Kw - h
	Total		2842,0	Kw - h
Custos totais	Consumo total diario		R\$	280,73
	Consumo total mensal		R\$	8441,93
	Demanda Ponta		R\$	0,00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	2415,00
	Pago Mensal		R\$	10856,93
Demanda máxima Fora de Ponta			300 KW	
Demanda máxima na Ponta			0 KW	

Tabela 5- Custos de energia horária e total para o caso 3- tarifa verde

Horario	Hora	Caso 3: O opera 21h (esta desligado na ponta)		
		Carga Térmica (Kw)	Consumo	
			(Kw-h)	(R\$)
Fora da Ponta	0--1	0,0	196,43	13,14
	1--2	0,0	196,43	13,14
	2--3	0,0	192,4	12,87
	3--4	0,0	192,4	12,87
	4--5	0,0	192,4	12,87
	5--6	0,0	192,4	12,87
	6--7	0,0	192,4	12,87
	7--8	1042,0	196,1	13,12
	8--9	1095,0	195,9	13,10
	9--10	1140,0	197,3	13,20
	10--11	1179,0	196,8	13,16
	11--12	1211,0	200,1	13,38
	12--13	1236,0	205,6	13,75
	13--14	1253,0	206,9	13,84
	14--15	1264,0	204	13,65
	15--16	1267,0	203,2	13,59
	16--17	1264,0	201,2	13,46
17--18	1253,0	202	13,51	
Ponta	18--19	1236,0	0,00	0,00
	19--20	1211,0	0,00	0,00
	20--21	1179,0	0,00	0,00
F. de Ponta	21--22	1140,0	210,7	14,09
	22--23	1095,0	214	14,31
	23--24	0,0	208,21	13,93
Valores totales de consumo	Fora da Ponta		2842,0	kW- h
	Ponta		0,0	kW-h
	Total		2842,0	kW-h
Custos totais	Consumo total diario		R\$	280,73
	Consumo total mensal		R\$	8421,86
	Demanda Ponta		R\$	0,00
	Demanda Fora de Ponta		R\$	0,00
	Pago Mensal		R\$	8421,86

Demanda máxima Fora de Ponta	300 kW
Demanda máxima na Ponta	0 kW

Tabela 6- Custos totais de energia por caso e tarifa.

Alternativa	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tarifa Azul	18 802,46	15 231,65	10 856,93
Tarifa verde	23 058,39	18 462,90	8 421,86

A tabela 17 apresenta um resumo dos custos apresentados para diferentes estratégias de operação. Nesta tabela se observa que o caso 3 é a alternativa de menor custo operacional, quando se usa a tarifa verde da Light.

Tabela 7- Alternativas de menores custos tarifários

Estratégia de operação	Demanda R\$	Consumo R\$	Total R\$
Caso 1:	9693	9110	18803
Caso2:	6462	8770	15232
Caso 3:	8422	0	8422

Mas ainda temos que obter os custos de investimento para obter a melhor alternativa global. A tabela 18 apresenta os menores custos tarifários separando os custos por demanda e por consumo para cada alternativa e observa-se que no caso 1 e 2 o menor custo tarifário obtêm-se com a tarifa azul, mas para o caso 3 obtêm-se com a tarifa verde.

4.3.2.

Determinação dos custos de investimento para cada alternativa

Usando o programa N° 3, obtêm-se também o volume do tanque de armazenamento em função da capacidade do chiller e da eficiência do tanque n_{ST} , assim como a energia armazenada, para uma razão H/D. Estes dados são apresentados para os casos de termoacumulação na tabela 19.

Tabela 8- Capacidade de armazenamento e geometria do tanque

Alternativa	Caso 2			Caso 3		
H/D	0,50	0,38	0,25	0,50	0,38	0,25
n_{st}	0,91	0,87	0,80	0,92	0,83	0,81
CAP_ch (kW)	796,10	806,90	827,70	910,60	924,00	950,20
E_armz(kW-h)	6369,00	6455,00	6621,00	7285,00	7392,00	7601,00
Vol_ta (m ³)	1097,00	1111,00	1140,00	1254,00	1273,00	1309,00
H (m)	7,04	5,38	4,50	7,40	6,20	4,70
D (m)	14,08	15,57	17,97	14,73	16,29	18,82

Como se observa na tabela anterior, o tanque tem um maior desempenho para uma razão $H/D = 0,5$. Por isto nesta análise usaremos os dados obtidos com este valor.

4.3.2.1. Cálculo do custo dos equipamentos

Para fazer a comparação entre as diferentes estratégias de operação, precisamos realizar uma estimativa do custo de instalação inicial de cada alternativa, o qual é mostrado a seguir, onde se consideram os custos unitários apresentados na tabela-20, para um cambio $US\$1 = R\$ 3,00$.

Tabela 9- Custos unitários e características de equipamentos de termoacumulação (Dorgan, 1994)

Principais Características do sistema de água gelada	
Tipo de resfriador	Água padrão
Custo de resfriador (chiller)	\$70/kW
Volume do armazenamento (tanque)	0.13 m ³ /kW-h
Custo do tanque de armazenamento	\$15 / kW-h
Temperatura de carga	4 até 6 °C
Eficiência de carga do resfriador	5.9 até 5.0 COP
Temperatura de descarga	11 até 15 °C
Interface do tanque	Tanque aberto
Comentários	A capacidade do tanque incrementa-se com a diferença de temperaturas.

Tabela 10-custo dos equipamentos

Estratégia	Tamanho do resfriador (kW)	Custo (R\$)	Tamanho do armazenamento (kWh)	Custo (R\$)	Custo total inicial (R\$)
Caso 1	284,4	59 724	-	-	59 724
Caso 2	284,4	59 724	6 369	286 605	346 349
Caso 3	284,4	59 724	7 285	327 825	387 529

Observar que o tamanho do resfriador é igual para os três casos, embora os consumos sejam bem diferentes, isto é devido a que o tamanho do resfriador (chiller), é determinado por a potência instalada (em todos os casos se considerou uma potência instalada equivalente a 2 chillers de 142,2 kW de potência nominal).

4.3.2.2. Análise do tempo de recuperação do capital

O resumo para a análise do tempo de recuperação das três alternativas é apresentado na tabela 22, onde observa-se que o menor tempo de recuperação é 32 meses, para o caso 2, usando a tarifa verde da Light.

Tabela 11- Análise econômico do tempo de recuperação de capital.

Análise do tempo de recuperação do capital (meses)						
Estratégia de operação	Energia elétrica (R\$/mês)	Economia (R\$/mês)	Custo do resfriador (R\$)	Custo de armazenamento (R\$)	Custo total de instalação (R\$)	Tempo de Recuperação de capital (meses)
Caso 1 (Tarifa azul)	18 803	-	59 724	-	59 724	-
Caso 2 (Tarifa verde)	15 232	3 571	59 724	286 605	346 329	80
Caso 3 (Tarifa verde)	8 422	10381	59 724	327 825	387 549	32

4.3.2.3. Volume e geometria do tanque de armazenamento

É importante indicar, que a geometria do tanque foi avaliada considerando um $H/D = 0,5$, porque, como se pode observar na tabela 19, para este valor a eficiência no caso 2 é 0,90 e para o caso 3 é 0,92.

Tabela 12- Geometria do tanque de armazenamento.

Geometria do tanque armazenamento de concreto para uma razão $H/D = 0,50$			
Alternativa	Volume (m^3)	Diâmetro (m)	Altura (m)
Caso 1	-	-	-
Caso 2	1097	7,04	14,08
Caso 3	1254	7,36	14,72

4.3.3. Seleção da estratégia de operação

A análise feita fica resumida na tabela 24, onde se pode observar que o caso 3, onde o chiller fica desligado no período de ponta, tem o menor tempo de recuperação de capital, pelo baixo custo operacional mensal. Por isto a tarifa verde da Light é a mais adequada para atender à demanda do bloco D do prédio Cardeal Leme da PUC-Rio.

O custo do tanque de armazenamento representa uma parcela significativa do investimento inicial global; 83% e 85 % para os casos 2 e 3 respectivamente. A economia nos custos operacionais, todavia, justificam plenamente o maior investimento neste item, face à economia mensal obtida nos custos operacionais. Um acréscimo de R\$ 41 220,00 quando se comparam os casos 2 e 3 acarretam em uma redução de \$ 6 810,00 ao mês. Por esta razão o caso 3 se apresenta como a melhor opção.

Tabela 24- Comparação final das alternativas.

Opção	Estratégia de operação	Consumo mensal (R\$)	Tempo de recuperação do capital inicial (meses)	Volume de armazenamento (m ³)
Caso 1: (tarifa azul)	Sem Armazenamento	18 802	-	-
Caso 2: (tarifa verde)	Chiller ligado na ponta	15 232	80	1097
Caso 3: (tarifa verde)	Chiller ligado na ponta	8422	32	1254

4.3.4. Seleção dos componentes

Da simulação numérica feita com o modelo desenvolvido, determinou-se que o chiller TRANE MODELO RTHB 215 é adequado para atender a demanda da carga térmica do bloco D do prédio Cardeal Leme da PUC-Rio, tendo que usar 2 compressores parafuso do modelo indicado, cujas características são apresentadas a seguir, junto com as características mais importantes dos outros componentes, como a torre de resfriamento e o tanque (no processo de carga).

Tabela 25- Características do componentes do sistema de termoacumulação condições nominais.

Parâmetro	Componente do sistema		
	Chiller parafuso a água	Torre de resfriamento de contato direto	Tanque de armazenamento de concreto – aberto
Temperatura da água na entrada (°C)	13 a 15		11
Temperatura da água na saída (°C)	5 a 6	29,4	6
Pressão da água (kPa)	100	100	100
Vazão mássica da água no evaporador (kg/s) – nominal	25,23		
Vazão mássica da água no condensador - torre (kg/s)	37,85	37,85	
Capacidade (TR) ou volume (m ³).	200	-	1254