

4

RESULTADOS

Uma vez analisados os parâmetros que se ajustam ao modelo matemático, se obtém os resultados respectivos. Novamente, estes se mostrarão primeiramente divididos por circuito e por ciclo, para finalmente juntá-los no comportamento que teria uma planta de energia. De igual maneira, o parâmetro principal para apresentar os resultados será a eficiência isentrópica do expensor, que influi na eficiência termodinâmica do ciclo e, em consequência, no sistema como um todo.

4.1

CIRCUITO DO CICLO RANKINE ORGÂNICO

4.1.1

Recuperador

Lembrando que no recuperador se faz a troca de calor entre o fluido orgânico que sai superaquecido do expensor, chamado de lado quente, e o fluido orgânico que sai da bomba, antes de entrar no gerador, chamado de lado frio. O processo pode ser considerado como num trocador de contrafluxo, tal como mostrado na seguinte figura:

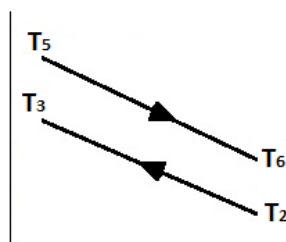


Figura 4.1 – Esquema de troca de calor no recuperador

A partir desta característica do expensor se apresentam os principais parâmetros para o recuperador, tanto em temperaturas (T_2 , T_3 , T_5 e T_6), quedas de pressão (ΔP_{23} e ΔP_{56}), vazão mássica ($\dot{m}$) e medidas do aparelho (N_{tr} e L_{23}):

Tabela 4.1 – Principais parâmetros resultantes para o recuperador

η_{st} [%]	T_6 [K]	T_5 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	ΔP_{23} [Pa]	ΔP_{56} [kPa]	N_{tr}	L_{23} [m]	$\dot{m}$ [kg/s]
40	372	471,7	313	389,3	31	7,6	160	2,5	1,93
50	365	463,1		387,5	20	4,86			1,5
60	360	454,7		384,4	14	3,44			1,22
70	355	446,2		381,4	11	2,5			1,03
80	352	437,7		377	8	2,07			0,89
100	344	420,4		369,5	6	1,26			0,71

A escolha da temperatura T_6 determina que fração (ou porcentagem) da fase superaquecida que sai do expansor vai ser aproveitada no recuperador para pré-aquecer o fluido de trabalho antes de ingressar no gerador de vapor. Menores temperaturas para T_6 determinam maior grau de aproveitamento, mas, como já se viu, levam a recuperadores de maiores dimensões. O seguinte gráfico mostra a relação entre esta temperatura e a fração aproveitada:

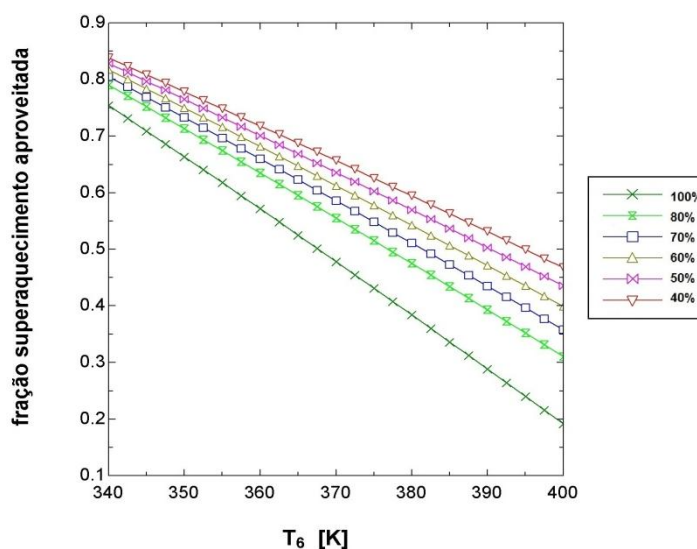


Figura 4.2 – Fração de superaquecimento aproveitada vs. Temperatura de saída do lado quente do recuperador

4.1.2

Condensador

A troca de calor que acontece no condensador se dá entre dois fluidos: o fluido orgânico e água como fluido frio. O orgânico começa seu processo como vapor superaquecido e termina como líquido saturado, enquanto, a água atua sempre em estado líquido. É importante que as temperaturas dos fluidos não se cruzem, ou seja, coincidam em alguma etapa do processo, para não criar um chamado *pinch point*. Isto se observa na seguinte figura:

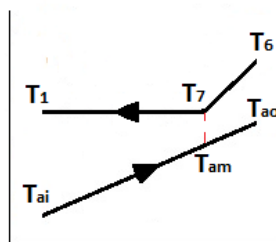


Figura 4.3 - Esquema de troca de calor no condensador

Assim como igual que no caso do recuperador se apresentam os resultados mais característicos para o condensador, tomando em consideração que o fluido orgânico vai passar de uma fase para outra durante o processo:

Tabela 4.2 – Principais parâmetros resultantes para o condensador

η_{st} [%]	T_6 [K]	T_7 [K]	T_1 [K]	T_{ai} [K]	T_{am} [K]	T_{ao} [K]	ΔP_c [Pa]	ΔP_{67} [kPa]	ΔP_{71} [kPa]	N_{tc}	L_c [m]	$\dot{m}_c$ [kg/s]
40	372	314,2	312,2	293	309,6	314	158	12,7	9,98	140	1,7	4,65
50	365	313,5			310,8	315	90	8,3	6,6			3,34
60	360	313,2			311,1	315	62	5,9	4,68			2,68
70	355	312,9			311,5	315	44	4,5	3,6			2,22
80	352	312,8			311,7	315	35	3,46	2,81			1,9
100	344	312,6			309,6	312	28	2,29	1,88			1,69

4.1.3

Gerador de vapor

Este dispositivo, incluído no ciclo Rankine, serve como integração com os coletores solares. A troca de calor acontece entre o fluido orgânico e o fluido térmico (HTF) que traz a energia de entrada para este ciclo termodinâmico. O HTF vai permanecer em estado líquido e o fluido orgânico vai passar do estado líquido a vapor superaquecido atravessando a fase de saturação. É também importante evitar a presença do *pinch point*. Pode-se apresentar o seguinte:

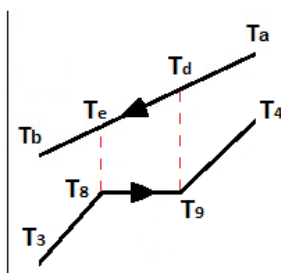


Figura 4.4 – Esquema de troca de calor no gerador de vapor

No gerador de vapor, ademais das temperaturas de entrada e saída para cada fluido, se consideram as temperaturas intermediárias. As perdas de pressão se especificam só para o fluido orgânico, porque para o HTF são ínfimas. As medidas de gerador para cada caso e os parâmetros antes citados se mostram como segue:

Tabela 4.3 – Principais parâmetros resultantes para o gerador de vapor

η_{st} [%]	T_a [K]	T_b [K]	T_e [K]	T_d [K]	T_3 [K]	T_4 [K]	$T_8 \approx T_9$ [K]	ΔP_{34} [Pa]	N_{tt}	L_h [m]	$\dot{m}_h$ [kg/s]
40	663	473	549,4	588,9	389,3	523	450,2	12	177	0,98	1,032
50			550,5	589,6	387,5			5,9		0,87	0,8
60			552,3	590,8	384,4			4,3		0,79	0,67
70			554,1	591,9	381,4			3,3		0,72	0,57
80			556,4	593,4	377			2,7		0,66	0,51
100			560,2	595,8	369,5			1,4		0,58	0,415

4.1.4

Resumo dos parâmetros do ciclo termodinâmico

Considerando as diferentes eficiências isentrópicas do expensor que foram parte da análise, obteve-se uma eficiência do ciclo termodinâmico (η_t) resultante. Também, como se viu, existiram temperaturas que determinaram o comportamento do ciclo (como T_6). A continuação, um resumo dos parâmetros simulados no presente trabalho para o ciclo Rankine orgânico:

Tabela 4.4 – Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico

η_{st} [%]	η_t [%]	Parâmetros recuperador				Parâmetros condensador				Parâmetros gerador		
		T_6 [K]	N_{tr}	L_{23} [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	T_{ao} [K]	N_{tc}	L_c [m]	$\dot{m}_c$ [kg/s]	N_{tt}	L_h [m]	$\dot{m}_h$ [kg/s]
40	10,9	372	160	2,5	1,93	314	140	1,7	4,65	177	0,98	1,032
50	14	365			1,5	315			3,34		0,87	0,8
60	16,9	360			1,22	315			2,68		0,79	0,67
70	19,7	355			1,03	315			2,22		0,72	0,57
80	22,2	352			0,89	315			1,9		0,66	0,51
100	27,2	344			0,71	312			1,69		0,58	0,415

Para uma melhor compreensão gráfica das implicações destes resultados se mostra na seguinte figura um diagrama $T - s$ com os diferentes estados para

cada um dos ciclos termodinâmicos especificados. É uma maneira de comparar cada um deles:

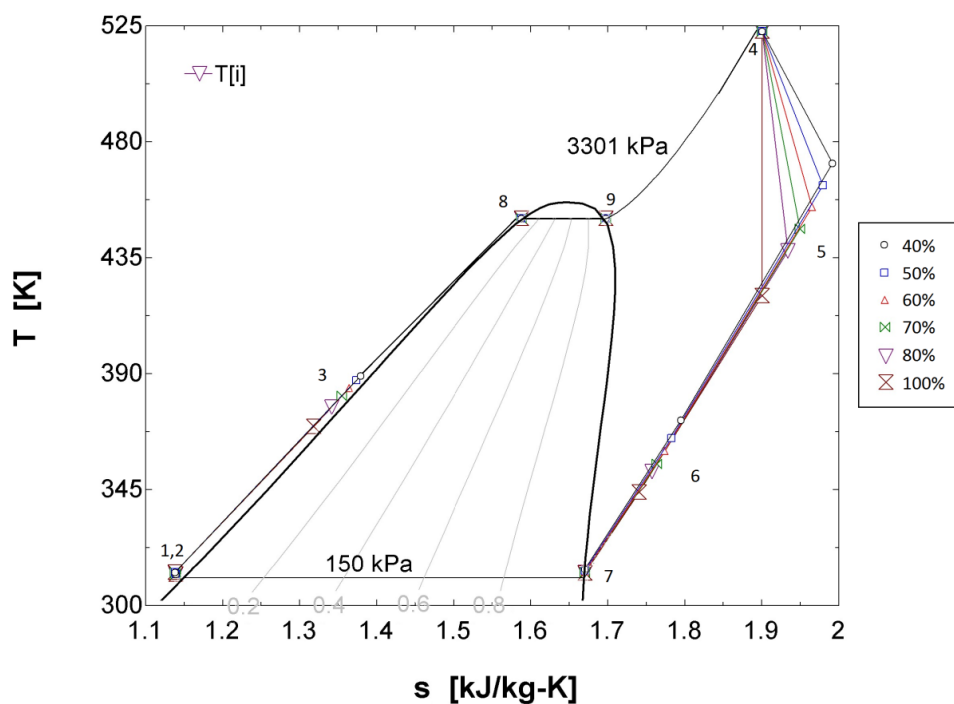


Figura 4.5 – Diagrama Temperatura (T) vs. Entropia (s) para os ciclos orgânicos Rankine estudados

Por razões ilustrativas se mostram para os diferentes níveis de eficiência isentrópica do expensor considerados, as quantidades de energia total fornecida ao ORC, a partir da qual uma parte é utilizada como potência gerada e a outra é calor rejeitado ao exterior. A seguinte tabela e os seguintes gráficos têm esta informação:

Tabela 4.5 – Calor rejeitado, potência gerada e energia fornecida ao ciclo ORC para diferentes η_{st}

η_{st} [%]	100	80	70	60	50	40
Calor rejeitado [kW]	134,1	174,4	204,4	245,3	307,5	408,2
Potência gerada [kW]	50	50	50	50	50	50
Energia fornecida [kW]	184,1	224,4	254,4	295,3	357,5	458,2

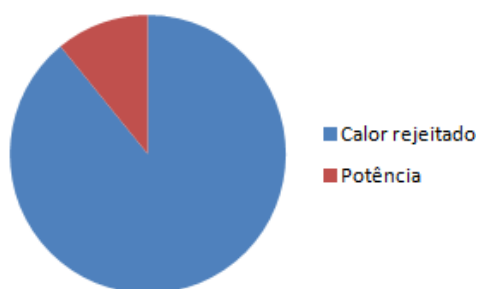


Figura 4.6 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 40\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

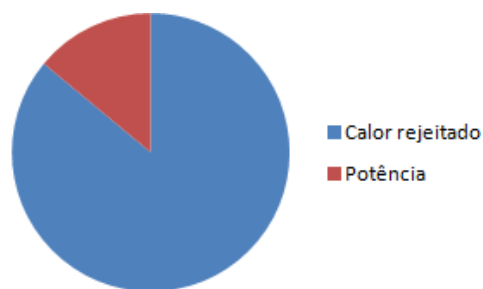


Figura 4.7 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 50\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

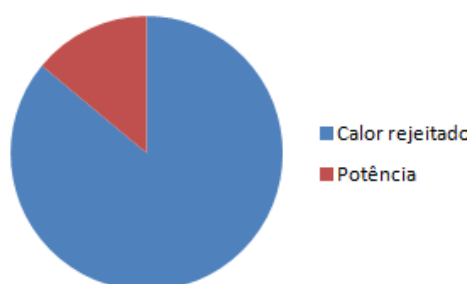


Figura 4.8 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 60\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

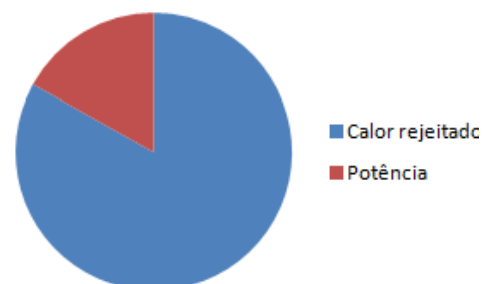


Figura 4.9 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 70\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

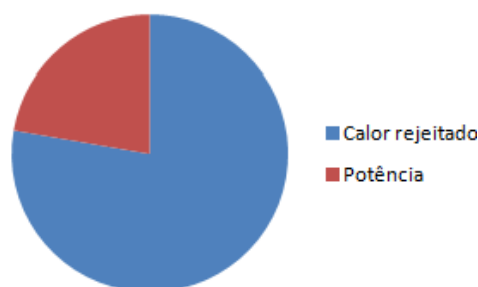


Figura 4.10 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 80\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

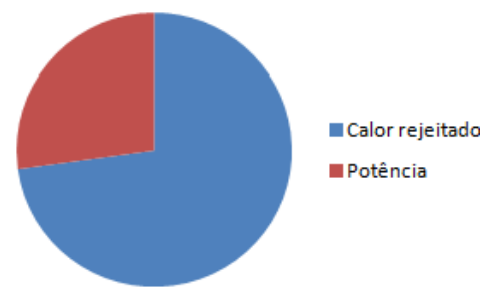


Figura 4.11 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 100\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo

Para o ciclo termodinâmico, finalmente a eficiência térmica resultante dependerá principalmente da eficiência isentrópica do expensor. Ademais, dado que na presente análise alguns dos parâmetros foram estabelecidos como fixos, o segundo fator que influi notoriamente é a temperatura T_6 . Esta temperatura de saída do lado quente do recuperador determina o grau de aproveitamento da fase superaquecida, que fica na saída do expensor, como visto anteriormente. Então, não será difícil inferir que a eficiência termodinâmica do ciclo será tão maior quanto maior a eficiência isentrópica do expensor e aproveitando a maior parte da fase superaquecida, ou seja, reduzindo a T_6 . Isto pode ser observado no gráfico seguinte:

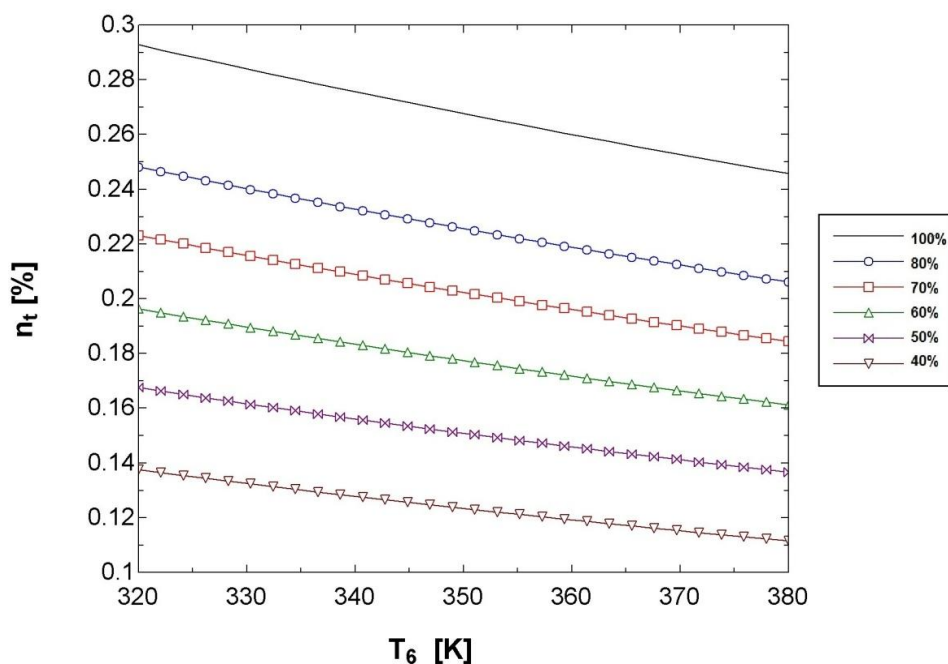


Figura 4.12 – Eficiência do ciclo termodinâmico em função da temperatura T_6 para diferentes eficiências isentrópicas do expensor

4.2

CIRCUITO DE COLETORES CONCENTRADORES SOLARES PARABÓLICOS

4.2.1

Análise de número de receptores necessários

A radiação solar direta que incide numa possível localização nunca é constante ou previsível, para uma hora e uma data específica do ano. Por esta razão, é necessário estimar o número de receptores de coletores solares que devem ser instalados numa planta de geração de potência a partir de energia solar térmica. Se estes coletores concentradores e seus respectivos receptores ficassem instalados em campo e um número extremadamente grande ou pequeno destes resultaria num projeto ineficiente ou antieconômico. Com este objetivo, começaremos a ver quantos receptores se necessitam para gerar 50 kW de potência útil, assumindo (inicialmente) radiação solar constante no plano de abertura, como está registrado nas tabelas 4.6 e 4.7:

Tabela 4.6 - Número de receptores necessários para o ciclo de 50 kW de potência para diferentes fluxos de radiação no plano de abertura para os HTFs: XCEL THERM® MK1, DOW THERM A, Therminol VP-1

η_{st} [%]	η_t [%]	$\dot{m}_h$ [kg/s]	Número receptores para $G_a =$			
			1 kW/m ²	0,8 kW/m ²	0,5 kW/m ²	0,3 kW/m ²
40	10,9	1,032	31	41		
50	14	0,8	24	32		
60	16,9	0,67	20	26	50	
70	19,7	0,57	17	22	42	
80	22,2	0,51	16	20	38	
100	27,2	0,415	13	16	31	78

Tabela 4.7 - Número de receptores necessários para o ciclo de 50 kW de potência para diferentes fluxos de radiação no plano de abertura para o HTF: SYLTHERM 800

η_{st} [%]	η_t [%]	$\dot{m}_h$ [kg/s]	Número receptores para $G_a =$			
			1 kW/m ²	0,8 kW/m ²	0,5 kW/m ²	0,3 kW/m ²
40	10,9	1,163	32	42		
50	14	0,91	25	33		
60	16,9	0,75	21	27	51	
70	19,7	0,65	18	23	44	
80	22,2	0,57	16	21	38	
100	27,2	0,47	13	17	32	80

Com os resultados anteriores é fatível considerar uma radiação no plano de abertura de desenho de 0,5 kW/m². Assim, se poderia estimar que com 50 receptores de 4 m cada (comprimento total de 200 m), seria possível o funcionamento de planta com, pelo menos, 50 kW para eficiências isentrópicas do expensor maiores ou iguais a 60% se a radiação especificada não se reduz de 0,5 kW/m². Este comprimento total considera também que a tecnologia atual desenha coletores de 100 m de comprimento com movimento individual. Com este nível de radiação de desenho, para eficiências isentrópicas menores, a planta funcionaria a potências menores à nominal (50 kW). Por outro lado, com eficiências isentrópicas maiores que 60% existiria uma potência útil disponível maior que 50 kW para radiações iguais ou maiores a 0,5 kW/m². Isto último é verdadeiro, ainda sem considerar um armazenamento térmico.

Considerando este número de receptores (50), se estabelecem diferentes parâmetros em função da radiação incidente no plano de abertura (G_a), como a vazão mássica do HTF ($\dot{m}_{htf}$), a queda de pressão (ΔP_{ca}), a energia incidente no coletor ($\dot{E}_s$), a energia transmitida ao HTF ($\dot{Q}_{ca-htf}$), as perdas de calor ($\dot{Q}_p$) e a

eficiência térmica do circuito de coletores (η_c). Lembrando que estes parâmetros consideram as temperaturas de entrada e saída especificadas na seção 3.1.5 (473 e 663 K). A seguir apresentam-se os resultados:

Tabela 4.8 – Resultados para 50 receptores considerando distintos níveis de radiação incidente no plano de abertura do coletor (G_a)

G_a [kW/m ²]	$\dot{m}_{htf}$ [kg/s]	ΔP_{ca} [Pa]	$\dot{E}_s$ [kW]	$\dot{Q}_{ca-htf}$ [kW]	$\dot{Q}_p$ [kW]	η_c [%]
0,30	0,27	233,73	345,6	116,69	147,38	33,76
0,35	0,37	405,01	403,2	161,57	146,47	40,07
0,40	0,48	638,6	460,8	207,38	144,66	45,01
0,45	0,58	890,7	518,4	251,12	145,02	48,44
0,50	0,67	1148,8	576	293,79	146,25	51,01
0,55	0,77	1468,9	633,6	337,16	146,88	53,21
0,60	0,87	1821,2	691,2	380,93	147,21	55,11
0,65	0,97	2208,3	748,8	424,3	147,94	56,66
0,70	1,07	2626,8	806,4	467,5	148,64	57,97
0,75	1,16	3032,3	864	510,2	149,94	59,05
0,80	1,27	3559,2	921,6	553,9	150,24	60,1
0,85	1,36	4019,9	979,2	596,6	151,64	60,93
0,90	1,46	4559,8	1036,8	639,2	152,64	61,65
0,95	1,56	5128,9	1094,4	683,1	153,51	62,42
1,00	1,66	5726	1152	726	154,28	63,02

Para um melhor entendimento da tabela anterior se apresenta o seguinte gráfico que detalha a partir da energia incidente ao coletor ($\dot{E}_s$) as parcelas da energia transmitida ao HTF ($\dot{Q}_{ca-htf}$), das perdas térmicas ($\dot{Q}_p$) e das perdas ópticas, em unidades de kW:

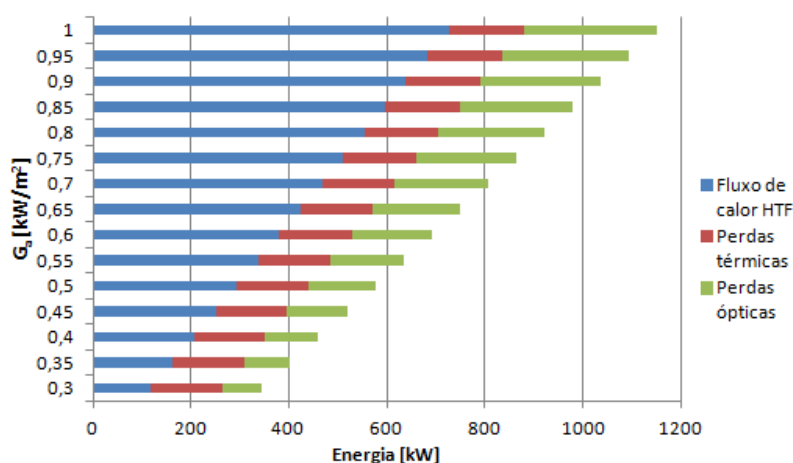


Figura 4.13 – Fluxos energéticos de ganho para o HTF ($\dot{Q}_{ca-htf}$), perdas térmicas ($\dot{Q}_p$) e perdas ópticas do coletor, considerando 50 receptores

A tendência da eficiência térmica do circuito de coletores (η_c) em função da radiação direta no plano de abertura do coletor se mostra a continuação:

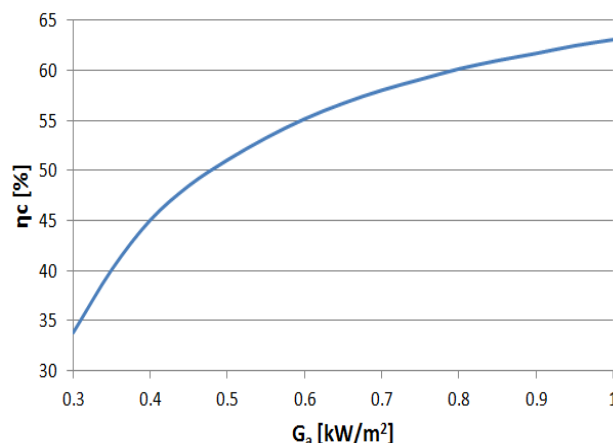


Figura 4.14 – Eficiência térmica do circuito de coletores (η_c) vs. radiação direta no plano de abertura do coletor

Outro detalhe apresentado na tabela anterior é a tendência de a vazão mássica ser linearmente proporcional à radiação direta no plano de abertura do coletor, como visto na figura abaixo:

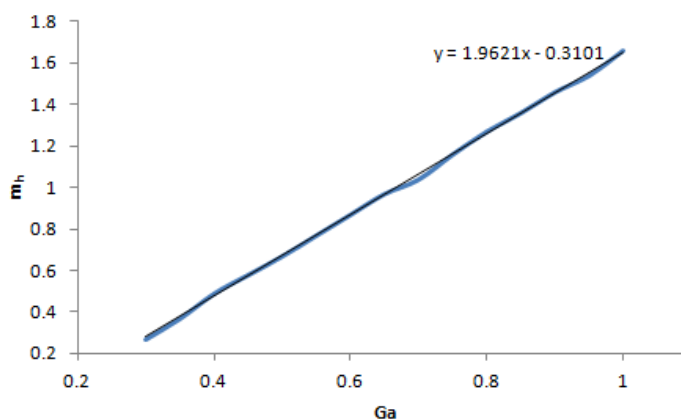


Figura 4.15 – Vazão mássica do HTF vs. radiação direta no plano de abertura

4.3

ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Este armazenamento trabalhará sob duas condições: na primeira este sistema ganha calor de uma parte do fluxo do fluido térmico para ser acumulado (modo de carga) e na segunda, o sistema entrega calor ao fluido térmico para

trabalhar nas horas da noite ou com radiação baixíssima (modo de descarga). Durante os dois processos, as temperaturas do sal fundido tanto no tanque frio (T_{sf}) como no tanque quente (T_{sq}) vão se manter constantes para manter o controle do armazenamento, ajudado no fato de os tanques serem isolados. As temperaturas do fluido térmico na etapa de carga vão se manter nos valores já conhecidos. Mas, no processo de descarga estas temperaturas baixaram 10 K, para permitir a troca de calor entre este fluido e o sal fundido que estará a uma maior temperatura. Os dois processos se mostram nas figuras 4.8 e 4.9, e as temperaturas para os dois tipos de sal fundido considerados, na tabela 4.8:

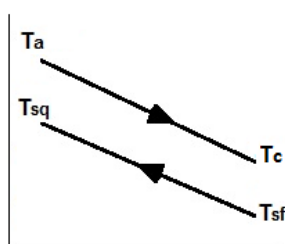


Figura 4.16 – Esquema de troca de calor entre o HTF e o sal fundido em modo de carga

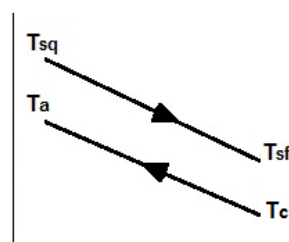


Figura 4.17 – Esquema de troca de calor entre o HTF e o sal fundido em modo de descarga

Tabela 4.9 – Temperaturas nos processos de carga e descarga no armazenamento térmico

Modo	T_{sq} [K]	T_{sf} [K]	T_a [K]	T_c [K]
Carga	658	468	663	473
Descarga			653	463

4.3.1

Possíveis dimensões do sistema de armazenamento térmico

O sistema de armazenamento térmico consiste principalmente em dois tanques de sal fundido: o quente e o frio. O tamanho dos tanques e a massa que se transfere de um tanque para outro dependem basicamente de o número de horas que este sistema teria capacidade de suprir energia para o ciclo Rankine orgânico na potência nominal (50 kW). Esta característica pertence ao modo de descarga. Em primeiro lugar, é adequado determinar a vazão mássica de sal fundido que se precisa para, com uma vazão constante, manter a potência útil nominal. Esta vazão variará segundo o tipo de sal considerado (Hitec ou Hitec XL), e novamente considerando a eficiência isentrópica do expensor:

Tabela 4.10 - Vazão mássica do sal fundido necessária para manter a potência nominal

Tipo de sal	T_{sq} [K]	T_{sf} [K]	$\dot{m}_d$ [kg/s]					
			40%	50%	60%	70%	80%	100%
Hitec	658	468	1,55	1,21	1	0,86	0,76	0,62
Hitec XL			1,67	1,3	1,08	0,92	0,82	0,67

Considerando estas vazões mássicas, determina-se a massa que passa de um tanque a outro durante o processo de descarga (e por conseguinte de carga). Esta quantidade dependerá do número de horas de armazenamento, ou seja o número de horas que o sistema poderia trabalhar só utilizando esta reserva térmica. De maneira ilustrativa, se escolheram dois regimes: um de 6 horas e outro de 8 horas:

Tabela 4.11 - Massa de sal fundido necessária para 6 horas de armazenamento térmico

Tipo de sal	Massa [kg]					
	40%	50%	60%	70%	80%	100%
Hitec	33480	26136	21600	18576	16416	13392
Hitec XL	36072	28080	23328	19872	17712	14472

Tabela 4.12 - Massa de sal fundido necessária para 8 horas de armazenamento térmico

Tipo de sal	Massa [kg]					
	40%	50%	60%	70%	80%	100%
Hitec	44640	34848	28800	24768	21888	17856
Hitec XL	48096	37440	31104	26496	23616	19296

Os volumes dos tanques que conteriam os sais fundidos são facilmente calculados, dividindo a massa que passa de um tanque a outro pela massa específica do sal respectivo. Neste caso, se adotou uma massa específica média da tabela 3.15, correspondente a 300 °C. Agora, deste volume resultante, o tanque teria que se acrescentar numa porcentagem para que o mesmo não se encha totalmente e também para deixar uma margem de sal fundido extra, esse aspecto está fora deste estudo. A continuação o volume que escoar segundo o número de horas de armazenamento:

Tabela 4.13 - Volume de sal fundido necessário para 6 horas de armazenamento térmico

Tipo de sal	Volume [m ³]					
	40%	50%	60%	70%	80%	100%
Hitec	19,93	15,56	12,86	11,06	9,77	7,97
Hitec XL	18,11	14,1	11,71	9,98	8,89	7,27

Tabela 4.14 - Volume de sal fundido necessário para 8 horas de armazenamento térmico

Tipo de sal	Volume [m ³]					
	40%	50%	60%	70%	80%	100%
Hitec	26,57	20,74	17,14	14,74	13,03	10,63
Hitec XL	24,14	18,8	15,61	13,3	11,86	9,69

4.4

COMPORTAMENTO DA PLANTA

Uma vez que se conhecem os circuitos que formam o sistema todo de geração de potência, pode-se analisar como seria o comportamento de uma planta de geração propriamente. Para isto, o número de receptores tem que ser fixado, já que os componentes do ciclo Rankine já são conhecidos. Na seção 4.2.1, já se falou que com 50 receptores o ciclo poderia gerar 50 kW (ou mais) quando a radiação direta seja maior que 0,5 kW/m² e a eficiência isentrópica superior a 60%, se a radiação está perto desse valor. Mas, o que acontece durante o período em que a radiação se apresenta baixa? A resposta é que a planta não pode trabalhar à potência nominal e muito menos acumular termicamente. Como resultado, a planta perde eficiência.

Para ter um melhor aproveitamento do recurso solar então, é conveniente “sobredimensionar” o campo de coletores. Optou-se por duplicar o número de receptores, mas, mantendo a vazão mássica, então se teria dois conjuntos de coletores paralelos de 50 coletores cada, juntando seus fluxos na entrada do gerador de calor e na saída este fluxo se dividiria por igual para cada conjunto. Na tabela 4.14 pode-se ver o desempenho deste modelo, a vazão total de HTF ($\dot{m}_{htf}$), a potência do ciclo, eficiência térmica dos coletores (η_c) e a vazão mássica que vai para o armazenamento ($\dot{m}_s$) em função da radiação direta no plano de abertura (G_a).

Tabela 4.15 – Análise de vazões mássicas e potências do ciclo considerando dois conjuntos em paralelo de 50 receptores cada

G _a [kW/m ²]	m _{htf} [kg/s]	Potência ciclo [kW]						η _c [%]
		m _s [kg/s]						
		40%	50%	60%	70%	80%	100%	
0,3	0,54	26,16 -	33,75 -	40,3 -	47,37 -	50 0,03	50 0,13	33,76
0,35	0,74	35,85 -	46,25 -	50 0,07	50 0,17	50 0,23	50 0,33	40,07
0,4	0,96	46,51 -	50 0,16	50 0,29	50 0,39	50 0,45	50 0,55	45,01
0,45	1,16	50 0,13	50 0,36	50 0,49	50 0,59	50 0,65	50 0,75	48,44
0,5	1,34	50 0,31	50 0,54	50 0,67	50 0,77	50 0,83	50 0,93	51,01
0,55	1,54	50 0,51	50 0,74	50 0,87	50 0,97	50 1,03	50 1,13	53,21
0,6	1,74	50 0,71	50 0,94	50 1,07	50 1,17	50 1,23	50 1,33	55,11
0,65	1,94	50 0,91	50 1,14	50 1,27	50 1,37	50 1,43	50 1,53	56,66
0,7	2,14	50 1,11	50 1,34	50 1,47	50 1,57	50 1,63	50 1,73	57,97
0,75	2,32	50 1,29	50 1,52	50 1,65	50 1,75	50 1,81	50 1,91	59,05
0,8	2,54	50 1,51	50 1,74	50 1,87	50 1,97	50 2,03	50 2,13	60,1
0,85	2,72	50 1,69	50 1,92	50 2,05	50 2,15	50 2,21	50 2,31	60,93
0,9	2,92	50 1,89	50 2,12	50 2,25	50 2,35	50 2,41	50 2,51	61,65
0,95	3,12	50 2,09	50 2,32	50 2,45	50 2,55	50 2,61	50 2,71	62,42
1	3,32	50 2,29	50 2,52	50 2,65	50 2,75	50 2,81	50 2,91	63,02

Falando sobre eficiência da planta, esta corresponde ao produto da eficiência do ciclo Rankine orgânico pela eficiência do conjunto de coletores. Como consequência, qualquer uma destas eficiências influi por igual na eficiência total. Como a eficiência do ciclo já é conhecida em função da eficiência isentrópica do expensor, e a eficiência dos coletores não é constante senão que varia com a radiação direta, então não existe um valor exato de eficiência total da planta. Esta eficiência varia dependendo das duas eficiências constituintes, como se determina no seguinte diagrama:

Tabela 4.16 – Diagrama de eficiência total da planta

		40	50	60	70	80	100	η_{st} [%]
		10,9	14	16,9	19,7	22,2	27,2	η_t [%]
0,3	33,76	3,68	4,73	5,71	6,65	7,49	9,18	
0,35	40,07	4,37	5,61	6,77	7,89	8,90	10,90	
0,4	45,01	4,91	6,30	7,61	8,87	9,99	12,24	
0,45	48,44	5,28	6,78	8,19	9,54	10,75	13,18	
0,5	51,01	5,56	7,14	8,62	10,05	11,32	13,87	
0,55	53,21	5,80	7,45	8,99	10,48	11,81	14,47	
0,6	55,11	6,01	7,72	9,31	10,86	12,23	14,99	
0,65	56,66	6,18	7,93	9,58	11,16	12,58	15,41	
0,7	57,97	6,32	8,12	9,80	11,42	12,87	15,77	
0,75	59,05	6,44	8,27	9,98	11,63	13,11	16,06	
0,8	60,1	6,55	8,41	10,16	11,84	13,34	16,35	
0,85	60,93	6,64	8,53	10,30	12,00	13,53	16,57	
0,9	61,65	6,72	8,63	10,42	12,15	13,69	16,77	
0,95	62,42	6,80	8,74	10,55	12,30	13,86	16,98	
1	63,02	6,87	8,82	10,65	12,41	13,99	17,14	
G_a [kW/m ²]	η_c [%]							

4.5

SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO COM DADOS REAIS

Para comprovar como funcionaria a planta desenhada se tomou dados correspondentes aos dias 1, 2, 3, 4 e 5 de janeiro de 2012, para a estação de monitoramento da cidade do Rio de Janeiro, fornecidos no site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Nesta fonte são fornecidos dados de energia radiativa (J/m²) integrados para cada hora do dia. Efetuando o procedimento detalhado na seção 2.1.3 se obtém a radiação direta no plano horizontal. Para esses dias, a radiação foi significativa entre as 6 e 18 horas locais, como é possível observar a seguir:

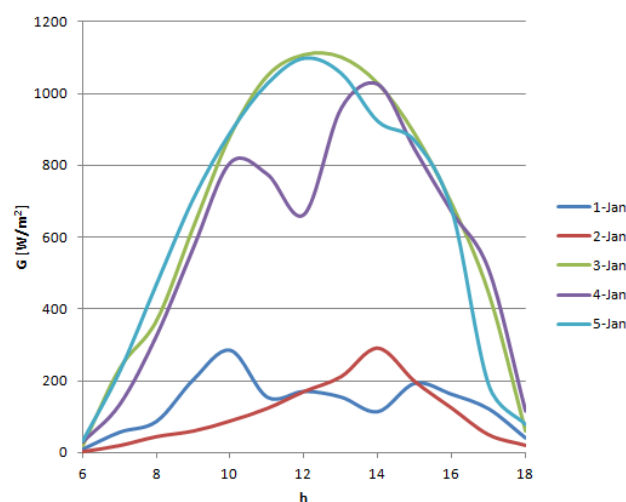


Figura 4.18 – Radiação total na horizontal para os dias 1, 2, 3, 4 e 5 de janeiro / 2012

Os dias 1 e 2 de janeiro resultaram com níveis muito baixos de radiação direta, em parte por presença de precipitações e nebulosidade nesses dias. Os dias 3, 4 e 5 resultaram com níveis bons de radiação, especialmente o 3 e o 5, o 4 apresentou um declive em horas da manhã, também provavelmente por presença de nuvens. Tomaram-se os dias 1, 3 e 4 de janeiro como dias de estudo para o caso.

4.5.1

1 de janeiro

Os dados de radiação direta na horizontal (G_b) e no plano de abertura (G_a) para este dia são apresentados na figura 4.11 e registrados seus valores na tabela 4.17:

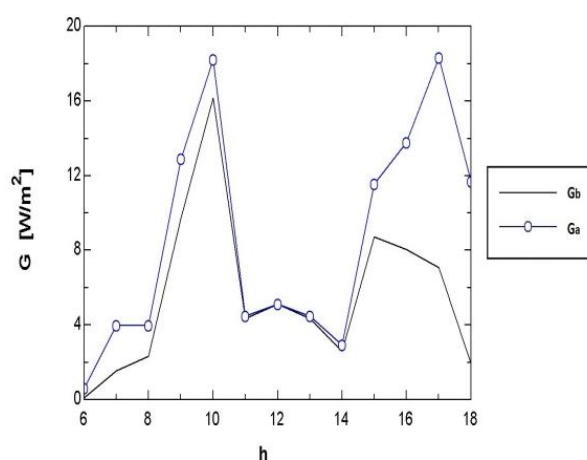


Figura 4.19: Radiações diretas horizontal (G_b) e no concentrador (G_a) calculadas a partir da medição para o dia 1 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude 23° S)

Tabela 4.17 – Radiação direta no plano de abertura do coletor (G_a) e na horizontal (G_b) para o dia 1 de janeiro de 2012

Hora	G_a [W/m ²]	G_b [W/m ²]
6	0.6341	0.1025
7	4.004	1.539
8	3.98	2.327
9	12.91	9.752
10	18.23	16.17
11	4.463	4.334
12	5.131	5.131
13	4.486	4.356
14	2.933	2.602
15	11.57	8.737
16	13.81	8.072
17	18.45	7.091
18	11.96	1.933

Dos dados anteriores, é notório que o máximo valor de radiação direta no plano de abertura foi menor a 20 W/m², valor tão baixo que não dá para gerar uma potência aceitável na planta. Este seria um dos piores casos, onde o fluxo de radiação é desprezível e a planta deveria trabalhar com a reserva do armazenamento térmico.

4.5.2

3 de janeiro

Os dados de radiação direta na horizontal (G_b) e no plano de abertura (G_a) para este dia aparecem na figura 4.12:

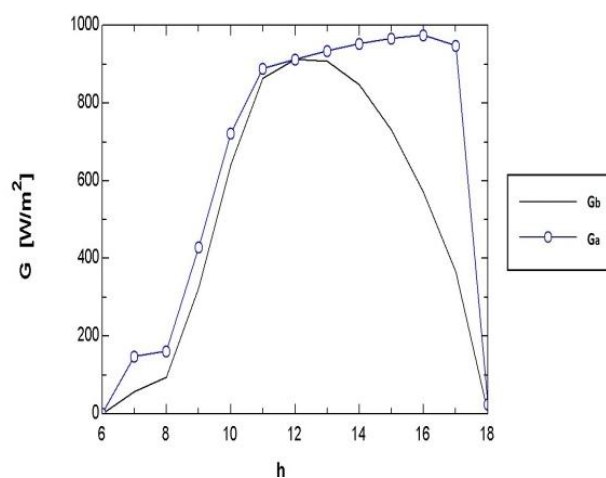


Figura 4.20: Radiações diretas horizontal (G_b) e no concentrador (G_a) calculadas a partir da medição para o dia 3 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude 23° S)

Já estes valores de radiação no plano de abertura resultaram ótimos especialmente a partir das 10 horas, atingindo valores próximos a 1 kW/m^2 às 16 horas. Assim, na tabela 4.17 se mostram os fluxos de HTF que foram direcionados para carregar o armazenamento ($\dot{m}_s$) e o número de horas de armazenamento que poderiam se utilizar posteriormente, dada esta carga com os fluxos de radiação aproximados deste dia:

Tabela 4.18 – Radiação direta no plano de abertura do coletor (G_a) e na horizontal (G_b), e vazões mássicas de HTF resultantes para o dia 3 de janeiro de 2012

Hora	$\dot{m}_{\text{htf}}$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]						G_a [W/m ²]	G_b [W/m ²]
		40%	50%	60%	70%	80%	100%		
6								2,391	0,3866
7								149,3	57,38
8								161,4	94,39
9	0,533	0,533	0,533	0,533	0,533	0,023	0,118	429,9	324,6
10	1,109	0,077	0,309	0,439	0,539	0,599	0,694	723,1	641,4
11	1,435	0,403	0,635	0,765	0,865	0,925	1,020	889,6	863,9
12	1,480	0,448	0,680	0,810	0,910	0,970	1,065	912,4	912,4
13	1,523	0,491	0,723	0,853	0,953	1,013	1,108	934,1	907,1
14	1,561	0,529	0,761	0,891	0,991	1,051	1,146	953,8	846,1
15	1,587	0,555	0,787	0,917	1,017	1,077	1,172	966,8	730,2
16	1,603	0,571	0,803	0,933	1,033	1,093	1,188	975,2	570,2
17	1,554	0,522	0,754	0,884	0,984	1,044	1,139	950	365,1
18								25,3	4,09
Horas com armazenamento		3,14	6,01	8,48	11,16	12,82	17,4		

Os valores em vermelho, mostram que o fluxo de HTF total foi menor que o precisado para operar a 50 kW e se preferiu enviar o fluxo para alimentar o armazenamento. Também o número de horas de armazenamento disponível resultou interessante, maior que 6 para 50% e maior que 8 para 60%.

4.5.3

4 de janeiro

Os dados de radiação direta na horizontal (G_b) e no plano de abertura (G_a) para este dia se apresentam na figura 4.13:

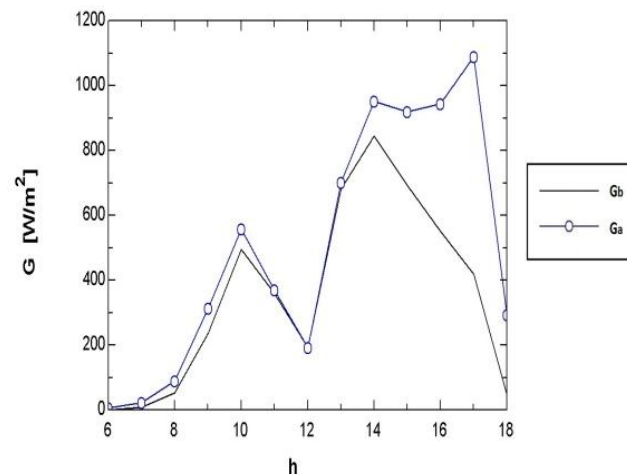


Figura 4.21: Radiações diretas horizontal (G_b) e no concentrador (G_a) calculadas a partir da medição para o dia 4 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude 23° S)

Neste dia, a partir da figura 4.10, se observa um descenso da radiação esperada em horas da manhã e no início da tarde. Esta situação se reflete no fato de que os valores de radiação direta no plano do coletor se aproximam de 1 kW/m^2 em menos horas que o dia anterior (3 de janeiro). Também os valores assinalados em vermelho correspondem a vazões de HTF que foram direto para alimentar o armazenamento devido a impossibilidade de gerar os 50 kW de potência. Da mesma maneira, o número de horas de armazenamento foram menores que as horas resultantes no dia estudado anteriormente.

Tabela 4.19 – Radiação direta no plano de abertura do coletor (G_a) e na horizontal (G_b), e vazões mássicas de HTF resultantes para o dia 4 de janeiro de 2012

Hora	$\dot{m}_{htf}$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]						G_a [W/m ²]	G_b [W/m ²]
		40%	50%	60%	70%	80%	100%		
6								5,807	0,9388
7								21,88	8,409
8								89,17	52,13
9	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	312,3	235,9
10	0,783	0,783	0,783	0,113	0,213	0,273	0,368	557	494,1
11	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,002	370,7	359,9
12	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	191,1	191,1
13	1,067	0,035	0,267	0,397	0,497	0,557	0,652	701,6	681,4
14	1,556	0,524	0,756	0,886	0,986	1,046	1,141	950,9	843,6
15	1,492	0,460	0,692	0,822	0,922	0,982	1,077	918,7	693,8
16	1,540	0,508	0,740	0,870	0,970	1,030	1,125	942,8	551,2
17	1,829	0,797	1,029	1,159	1,259	1,319	1,414	1090	418,8
18	0,265	0,265	0,265	0,265	0,265	0,265	0,265	293,2	47,4
Horas com armazenamento		3,38	5,66	6,73	8,86	10,54	13,29		