

5 Resultados

5.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos com o programa de simulação. Ênfase é dada à validação do modelo, comparando os resultados obtidos com o modelo com dados experimentais disponíveis.

5.2 Validação do Modelo

Os dados experimentais aqui apresentados foram fornecidos pela HONEYWELL INC. USA (Refrigerants Applications Laboratory–2007). Esta empresa está interessada no desenvolvimento de novos fluidos refrigerantes com baixo potencial de efeito estufa (LGWP), como os fluidos H e 1234yf, para a substituição do refrigerante R134a, principalmente em sua aplicação a sistemas condicionadores de ar automotivos.

Dois modelos foram testados, com uma mesma circuitagem para o refrigerante, porém com diferentes números de placa por tanque. Os dados geométricos gerais para cada modelo de evaporador são mostrados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Dados gerais para o evaporador número 1.

Evaporador número 1	
Material	Alumínio
Modelo	Plate/Fin
Área efetiva [mm]	W280 x H216 x D73
Número de tanques	3
Número de placas por tanque	[5-6-9]
Caso de solução	B

Tabela 5.2 – Dados gerais para o evaporador número 2.

Evaporador número 2	
Material	Alumínio
Modelo	Plate/Fin
Área efetiva [mm]	W286 x H196 x D62
Número de tanques	3
Número de placas por tanque	[6-7-8]
Caso de solução	B

5.2.1 Dados Experimentais para o R134a

As tabelas 5.3 a 5.6 mostram as condições de operação mantidas nos testes experimentais para os dois modelos de evaporador (números 1 e 2) com o refrigerante R134a, assim como as condições de operação do ar.

Dados experimentais também foram disponibilizados para os refrigerantes H e 1234yf.

Tabela 5.3 – Condições de operação do refrigerante R134a no evaporador número 1 (HONEYWELL, 2007).

Refrigerante R134a								
Teste	kg/s	kPa	°C	kPa	kPa	kJ/kg	kJ/kg	kW
	\dot{m}_{ref}	$P_{ref,in}$	$T_{ref,out}$	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	$h_{ref,in}$	$h_{ref,out}$	\dot{Q}_{ref}
ISH60	0,0358	491,40	19,36	446,00	45,40	297,22	412,33	4,12
ISH45	0,0355	448,40	14,84	405,10	43,30	277,87	409,11	4,66
LSH45	0,0475	421,20	16,19	337,20	84,00	273,08	411,99	6,59
HSH45	0,0539	399,10	10,90	272,80	126,30	269,60	408,80	7,51
ISH50	0,0326	424,60	8,64	383,90	40,70	282,22	403,90	3,96
ISH35	0,0324	388,30	8,32	348,20	40,10	263,30	404,58	4,58
LSH35	0,0425	364,20	10,95	290,10	74,10	261,05	408,42	6,26
HSH35	0,0475	344,80	6,65	238,10	106,70	257,55	405,93	7,05
ISH40	0,0279	344,20	2,17	310,50	33,70	266,79	400,04	3,71
ISH25	0,0250	325,20	6,35	297,10	28,10	247,08	404,16	3,92
LSH25	0,0288	331,40	9,35	292,30	39,10	240,53	406,95	4,80
HSH25	0,0294	324,60	9,21	284,30	40,30	236,94	407,02	5,01

Tabela 5.4 – Condições de operação do ar no evaporador número 1 (HONEYWELL, 2007).

Ar									
Teste	°C	°C	Pa	°C	kg/s	kPa	kg/kg	kg/kg	kJ/kg
	$T_{ar,in}$	$T_{ar,orva}$	ΔP_{ar}	$T_{ar,out}$	\dot{m}_{ar}	$P_{ar,in}$	$W_{ar,in}$	$W_{ar,out}$	$h_{ar,in}$
ISH60	44,81	21,70	122,10	22,17	0,1289	100,7	0,01646	0,0129	87,59
ISH45	44,63	21,71	122,70	20,25	0,1282	100,7	0,01647	0,0117	87,43
LSH45	44,62	21,70	153,60	18,40	0,1535	100,8	0,01645	0,0104	87,35
HSH45	44,57	21,71	154,30	16,33	0,1541	100,8	0,01646	0,0092	87,32
ISH50	34,79	21,31	128,70	17,24	0,1296	100,7	0,01606	0,0107	76,19
ISH35	34,70	21,29	130,90	15,48	0,1293	100,6	0,01606	0,0097	76,08
LSH35	34,96	21,31	159,30	13,51	0,1544	100,8	0,01605	0,0088	76,32
HSH35	34,89	21,30	159,70	11,31	0,1548	100,8	0,01604	0,0073	76,22
ISH40	25,25	18,00	132,20	10,05	0,1295	100,9	0,01299	0,0075	58,48
ISH25	25,03	18,00	133,60	10,02	0,1287	100,8	0,01300	0,0074	58,29
LSH25	24,93	18,00	163,00	10,27	0,1551	100,6	0,01303	0,0075	58,25
HSH25	24,98	18,01	163,10	9,96	0,1551	100,6	0,01304	0,0074	58,33

Tabela 5.5 – Condições de operação do refrigerante R134a no evaporador número 2 (HONEYWELL, 2007).

Refrigerante R134a								
Testes	kg/s	kPa	°C	kPa	kPa	kJ/kg	kJ/kg	kW
	\dot{m}_{ref}	$P_{ref,in}$	$T_{ref,out}$	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	$h_{ref,in}$	$h_{ref,out}$	\dot{Q}_{ref}
I45	0,0258	416,26	14,80	405,57	10,69	276,75	409,06	3,42
L45	0,0361	378,77	7,25	348,58	30,20	280,87	403,59	4,43
M45	0,0391	356,37	3,53	319,70	36,67	276,72	401,01	4,86
H45	0,0431	350,95	1,61	302,95	48,00	276,37	399,75	5,31
I50a	0,0283	468,98	20,96	456,49	12,49	286,72	413,58	3,59
I35a	0,0285	435,41	18,19	424,35	11,06	264,21	411,75	4,21
L35a	0,0398	394,48	9,03	363,20	31,28	268,60	404,82	5,42
M35a	0,0436	373,97	5,40	334,95	39,02	265,21	402,28	5,97
H35a	0,0476	365,09	3,25	314,77	50,32	264,09	400,89	6,51
I40c-3C	0,0221	345,52	5,46	338,42	7,10	264,69	402,23	3,04
I40c-10C	0,0168	378,14	10,47	375,37	2,77	261,35	405,83	2,43
I40a-3C	0,0252	393,69	11,96	383,49	10,19	267,87	406,99	3,51
I40a-10C	0,0252	393,69	11,96	383,49	10,19	267,87	406,99	3,51
I25a-3C	0,0255	364,08	8,27	356,38	7,69	246,61	404,31	4,02
I25a-10C	0,0251	380,17	10,97	371,64	8,53	247,72	406,38	3,98
L25a-3C	0,0336	313,81	0,26	292,30	21,50	249,27	398,84	5,02
L25a-10C	0,0243	383,57	11,82	377,08	6,50	244,04	407,02	3,96
M25a-3C	0,0385	320,20	0,31	288,85	31,35	247,75	398,99	5,82
M25a-10C	0,0242	382,49	11,96	376,55	5,94	240,88	407,17	4,02
H25a-3C	0,0377	319,50	0,32	291,19	28,32	244,51	398,94	5,82
H25a-10C	0,0240	377,30	12,09	373,43	3,87	239,46	407,37	4,04
I30-3C	0,0177	303,91	1,03	300,57	3,34	246,90	399,30	2,70
I15-3C	0,0149	295,30	0,40	294,76	0,55	226,36	398,90	2,57
L15-3C	0,0149	299,74	1,14	299,32	0,42	225,39	399,43	2,59
M15-3C	0,0151	299,73	0,97	299,07	0,66	223,88	399,28	2,65
H15-3C	0,0154	301,15	1,42	299,89	1,26	223,60	399,67	2,71
charge	0,0462	427,66	11,28	389,79	37,87	269,83	406,19	6,30

Tabela 5.6 – Condições de operação do ar no evaporador número 2
(HONEYWELL, 2007).

Ar									
Testes	°C	°C	Pa	°C	kg/s	kPa	kg/kg	kg/kg	kJ/kg
	$T_{ar,in}$	$T_{ar,orva}$	ΔP_{ar}	$T_{ar,out}$	\dot{m}_{ar}	$P_{ar,in}$	$W_{ar,in}$	$W_{ar,out}$	$h_{ar,in}$
I45	34,98	12,28	139,42	12,12	0,1491	98,99	0,009	0,0087	58,55
L45	35,01	12,07	146,12	8,67	0,1495	99,02	0,009	0,0075	58,24
M45	34,96	12,17	146,47	6,55	0,1499	99,17	0,009	0,0067	58,31
H45	34,96	12,01	145,17	5,00	0,1500	98,51	0,009	0,0064	58,22
I50a	34,99	19,39	152,28	16,30	0,1498	98,54	0,015	0,0122	72,50
I35a	35,02	19,33	151,07	14,28	0,1496	98,49	0,014	0,0112	72,39
L35a	35,00	19,43	146,57	10,73	0,1489	98,99	0,015	0,0094	72,44
M35a	35,04	19,38	149,87	8,37	0,1496	98,99	0,014	0,0086	72,36
H35a	34,99	19,40	153,04	6,80	0,1500	98,56	0,015	0,008	72,52
I40c-3C	25,01	13,75	85,75	6,16	0,1085	98,40	0,010	0,0068	50,88
40c-10C	25,01	14,02	83,69	10,01	0,1085	98,98	0,010	0,0081	51,20
I40a-3C	25,02	21,26	87,98	10,77	0,1088	99,02	0,016	0,0094	66,66
40a-10C	25,02	21,26	87,98	10,77	0,1088	99,02	0,016	0,0094	66,66
I25a-3C	25,01	21,35	91,41	8,66	0,1084	98,76	0,016	0,0085	67,00
25a-10C	24,95	21,37	89,06	9,96	0,1089	99,06	0,016	0,0091	66,85
L25a-3C	25,01	21,26	89,64	3,54	0,1087	99,03	0,016	0,0066	66,65
25a-10C	25,01	21,42	90,64	10,04	0,1081	98,94	0,016	0,0091	67,10
M25a-3C	24,99	21,40	90,25	3,05	0,1089	98,90	0,016	0,0065	67,05
I25a-10C	25,01	21,44	92,03	10,05	0,1084	98,95	0,016	0,0092	67,15
H25a-3C	25,14	21,30	87,60	3,02	0,1087	98,54	0,016	0,0066	67,09
H25a-10C	25,00	21,43	89,52	9,99	0,1086	98,94	0,016	0,0091	67,12
I30-3C	15,01	11,66	88,50	3,00	0,1082	98,81	0,009	0,0053	37,23
I15-3C	15,00	11,65	89,65	2,94	0,1090	98,96	0,009	0,0053	37,17
L15-3C	15,00	11,65	87,02	3,09	0,1084	99,01	0,009	0,0054	37,16
M15-3C	14,99	11,76	89,23	3,01	0,1088	99,03	0,009	0,0054	37,31
H15-3C	14,99	11,72	88,78	2,92	0,1083	99,22	0,009	0,0054	37,21
charge	39,98	23,73	144,32	13,03	0,1423	98,56	0,019	0,0116	89,37

**5.2.2
Comparação com Dados Experimentais**

Para iniciar a simulação numérica dos evaporadores precisou-se das condições de operação de entrada do refrigerante e do ar, da geometria das aletas e das placas, assim como da seleção do circuito do refrigerante. Como resultado da simulação, prevêem-se as condições globais de saída do refrigerante e do ar, assim como a taxa de transferência de calor do evaporador.

O critério utilizado para comparar os resultados experimentais com os numéricos foi o erro relativo (%), expresso através da seguinte equação:

$$Erro(\%) = \left(\frac{X_{num} - X_{exp}}{X_{exp}} \right) \times 100 \tag{5.1}$$

onde:

X_{num} Variável de saída ($P_{ref,out}, \Delta P_{ref}, T_{ref,out}, \dot{Q}_{evap}$) da simulação numérica.

X_{exp} Variável experimental ($P_{ref,out}, \Delta P_{ref}, T_{ref,out}, \dot{Q}_{evap}$).

Para um melhor entendimento de comparação com dados experimentais, foi montado o gráfico do erro relativo da variável simulada versus a variável experimental em questão. Esta análise proporciona a magnitude do erro atingido no processo de simulação do evaporador. Trabalhou-se com quatro combinações de correlações de transferência de calor e queda pressão, sendo apresentadas na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Combinações das correlações de transferência de calor e queda de pressão

Combinações de correlações testadas			
#	Transferência de calor	Queda de pressão	Combinação
1	Han et al., 2003.	Han et al., 2003.	Han - Han
2	Cooper, 1984b.	Yan e Lin, 1999	Cooper-Yan e Lin
3	Han et al., 2003.	Yan e Lin, 1999	Han - Yan e Lin
4	Cooper, 1984b.	Han et al., 2003.	Cooper - Han

5.2.2.1 Simulação Numérica do Evaporador Número 1.

Os dados de entrada do evaporador 1 são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Dados de entrada do evaporador número 1.

Dados gerais		
Altura da placa	0,216	[m]
Comprimento da placa	0,073	[m]
Número de divisões da placa	15	[-]
Número de passos	2	[-]
Refrigerante	R134a	[-]
Condutividade térmica da placa	0,2093	[kW/m-k]
Condutividade térmica da aleta	0,2093	[kW/m-k]
Geometria da placa		
Espaço médio do canal	1E-3	[m]
Taxa longitude desenvolvida e projetada	1,16	[-]
Espessura da placa	0, 7E-3	[m]
Passo do canal	4,4E-3	[m]
Ângulo do corrugado	75	[Grados]
Número de canais	6	[-]
Geometria da aleta		
Altura da aleta	8,72E-03	[m]
Passo da aleta	1,4E-03	[m]
Espessura da aleta	0,012E-03	[m]
Passo da persiana	2.25E-03	[m]
Comprimento da persiana	7E-03	[m]
Ângulo da persiana	17	[Grados]
Evaporador número 1		
Seleção das correlações		
Correlação de troca de calor - refrigerante	1 ou 2	
Correlação de queda de pressão - refrigerante	1 ou 2	
Circuitagem		
Número de tanques	3	
Condição de ingresso no 1er tanque (A ou B)	B	
Número de placas por tanque		
Placas do tanque 1	5	
Placas do tanque 2	6	
Placas do tanque 3	9	
Placas do tanque 4	0	

As condições de entrada de operação do refrigerante, $P_{ref,in}$, $h_{ref,in}$, \dot{m}_{ref} e do ar, $P_{ar,in}$, $T_{ar,in}$, $T_{ar,orva,in}$, \dot{m}_{ar} , foram obtidas das tabelas 5.3 e 5.4 para o evaporador número 1.

O evaporador é simulado na operação com o refrigerante R134a e com o fluido H. Os únicos parâmetros que variam são: fluido refrigerante, e as condições de entrada de operação do refrigerante e do ar, obtidas das tabelas 5.3 e 5.4, mantendo-se constantes, obviamente, a geometria das placas e aletas.

5.2.2.1.1

Resultados da Simulação do Evaporador Número 1 com o Refrigerante R134a.

Na figura 5.1 observa-se que a faixa de erro da pressão de saída do refrigerante vai de um máximo de 29,2% ao mínimo de -3,5%, correspondente às combinações Cooper-Han (máxima) e Han-Han (mínima) respectivamente. As combinações com melhor resultado foram Cooper-Yan e Lin e Han-Yan e Lin.

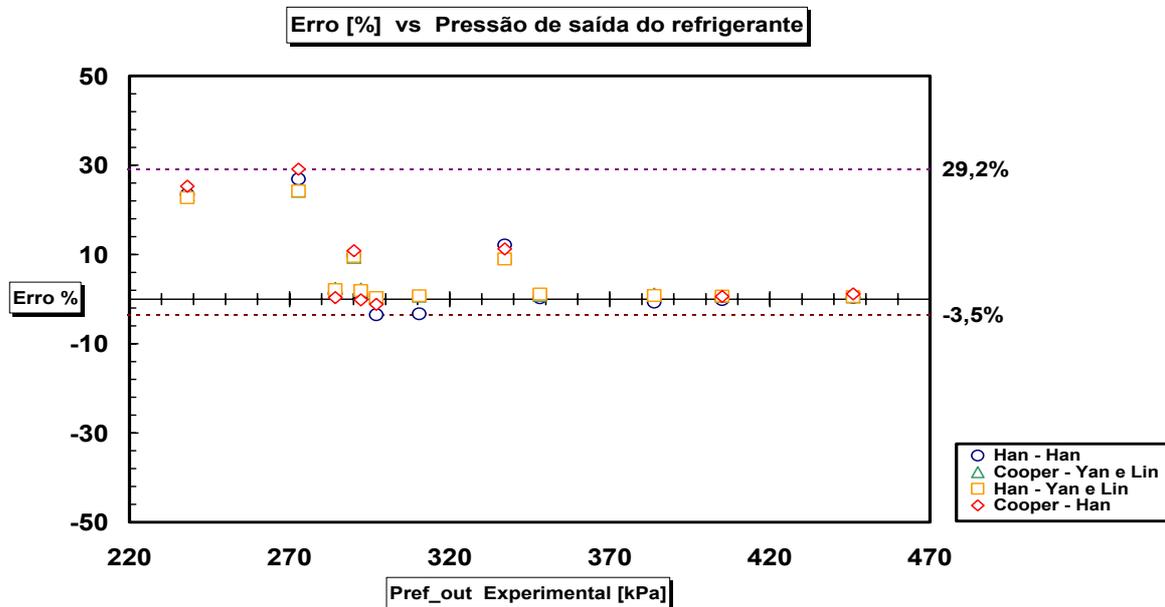


Figura 5.1 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do refrigerante R134a, com o evaporador 1.

Os resultados da figura 5.2 apresentam a comparação da queda de pressão do refrigerante (R134a), com um erro máximo de 37,2% (Han-Han) e mínimo de -62,2% (Cooper-Han). Observa-se que, mediante o uso das combinações das correlações de Cooper-Yan e Lin e de Han-Yan e Lin, obtêm-se os melhores resultados da simulação.

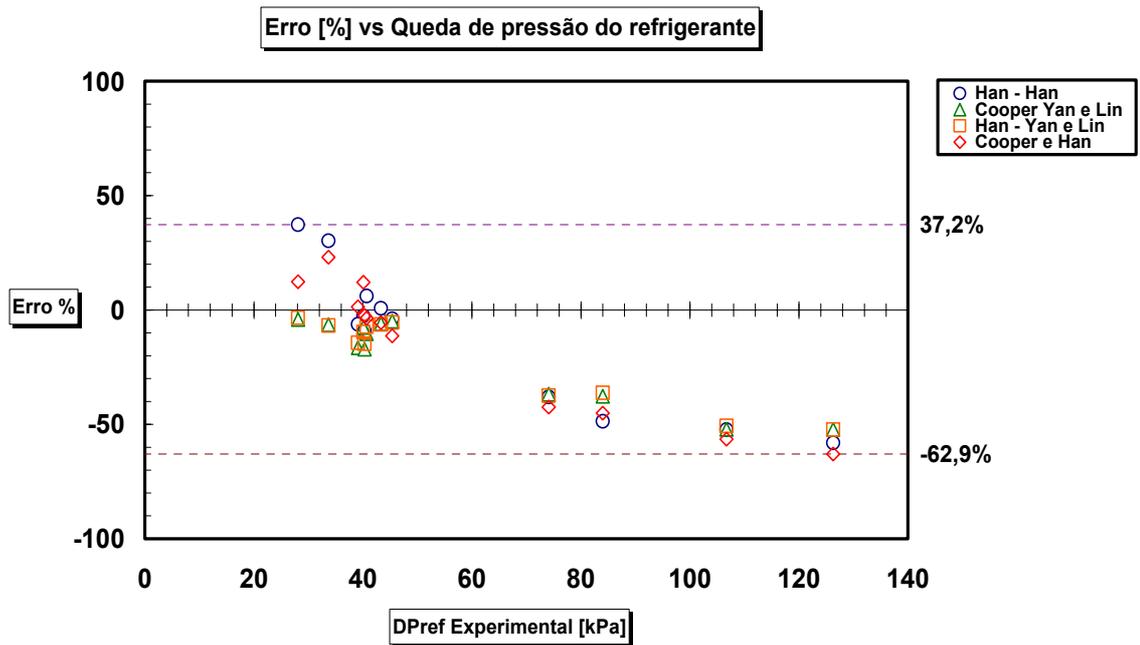


Figura 5.2 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do refrigerante R134a, com o evaporador 1.

A figura 5.3 apresenta a diferença de temperatura, na saída do refrigerante, de $\pm 9,7^{\circ}\text{C}$.

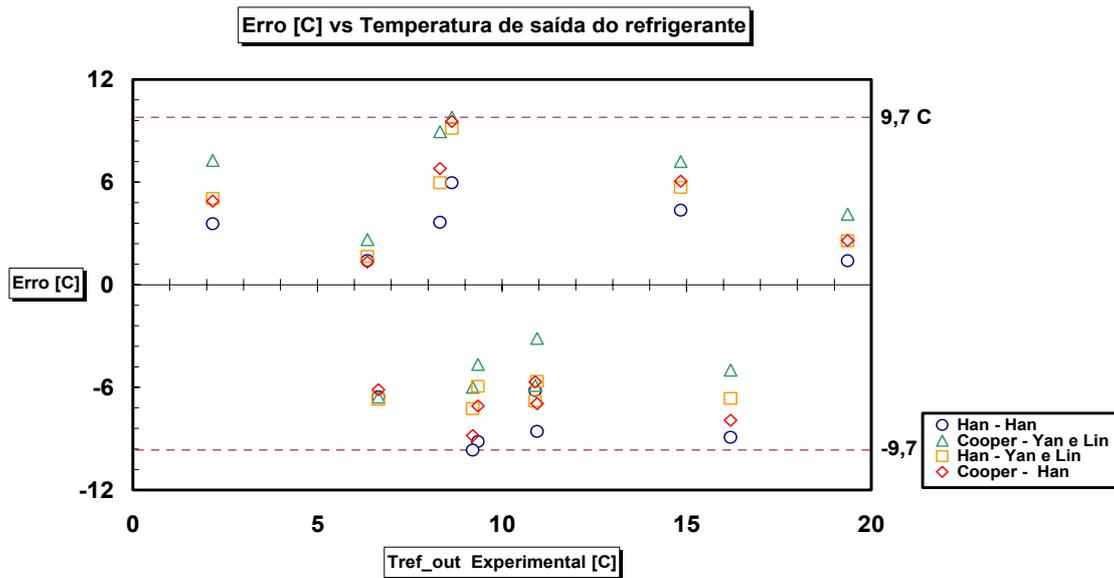


Figura 5.3 – Erro em (°C) da temperatura de saída do refrigerante R134a, com o evaporador 1.

Os resultados da taxa de transferência de calor do lado do refrigerante são apresentados na figura 5.4, com erros entre 7,3 % (máximo) e -10,3% (mínimo). Obtêm-se os melhores resultados com o do uso da combinação das correlação de Cooper-Yan e Lin.

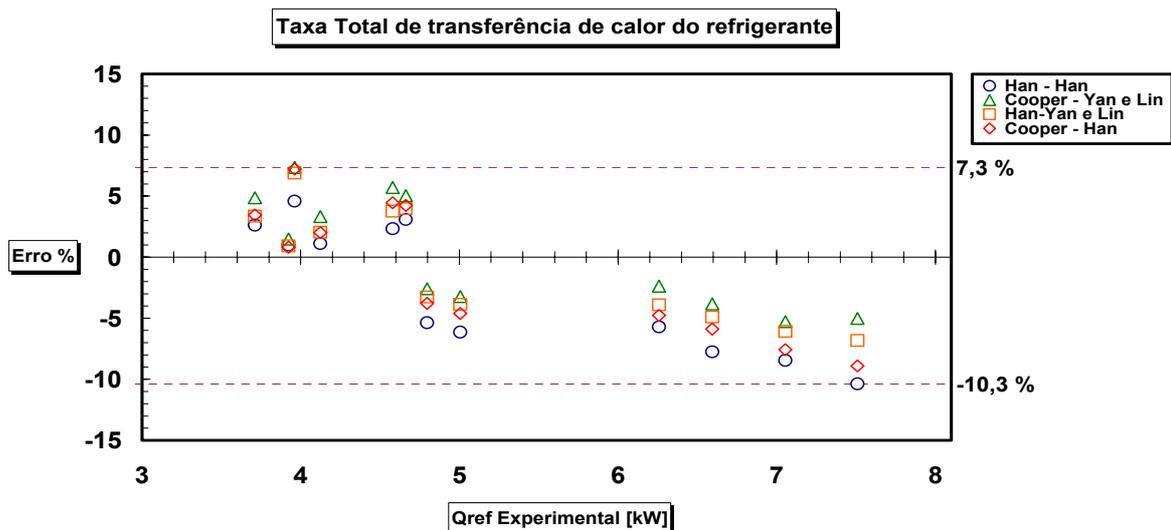


Figura 5.4 – Erro relativo em (%) da taxa de transferência de calor do refrigerante R134a, com o evaporador 1.

Os resultados da simulação da queda de pressão e da temperatura de saída do ar, usando as 4 combinações de correlações, são apresentadas na figura 5.5 e 5.6 ,respectivamente.

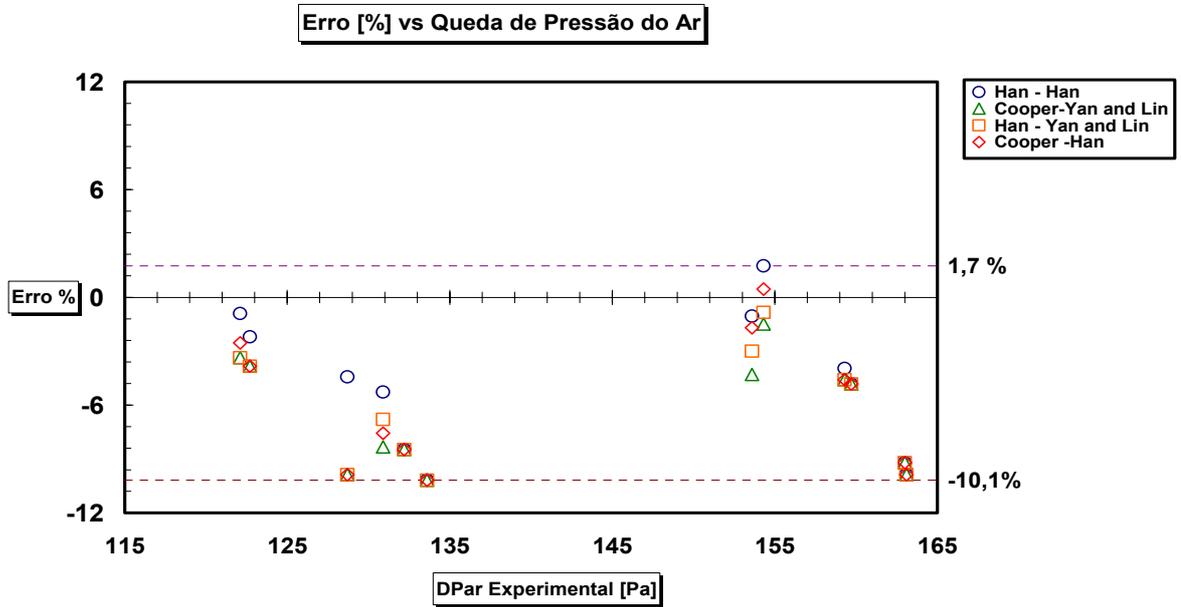


Figura 5.5 – Erro relativo da queda de pressão do ar, para o refrigerante R134a, com o evaporador 1.

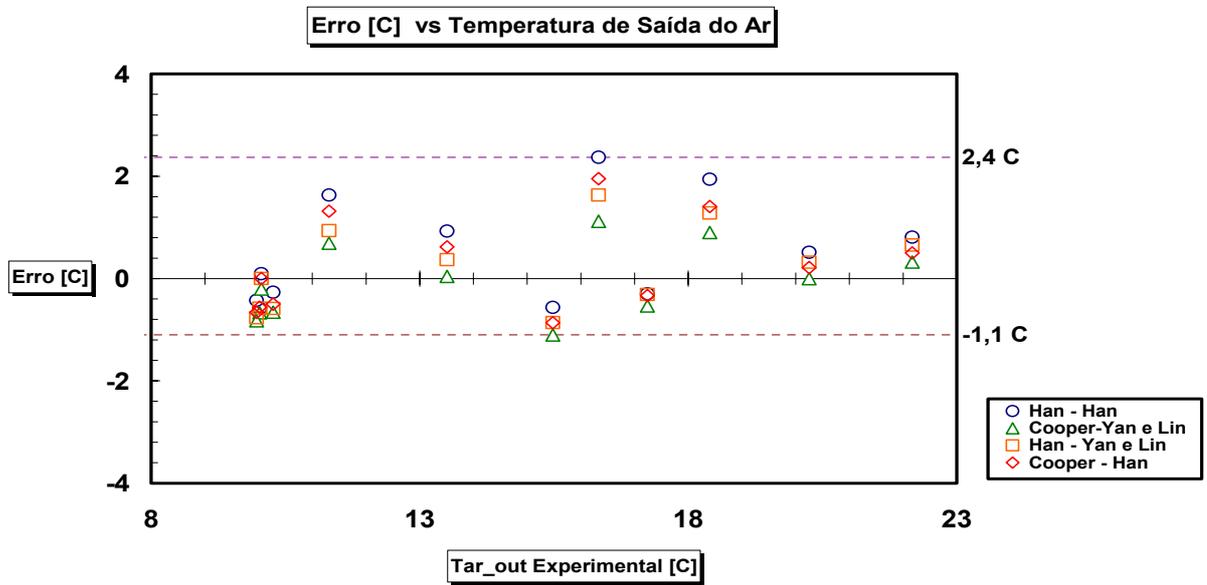


Figura 5.6 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar, para o refrigerante R134a com o evaporador 1.

Na figura 5.7, apresentam-se, os resultados da comparação da taxa de transferência de calor do lado do ar, observando-se que a combinação Cooper-Yan e Lin proporciona uma melhor aproximação.

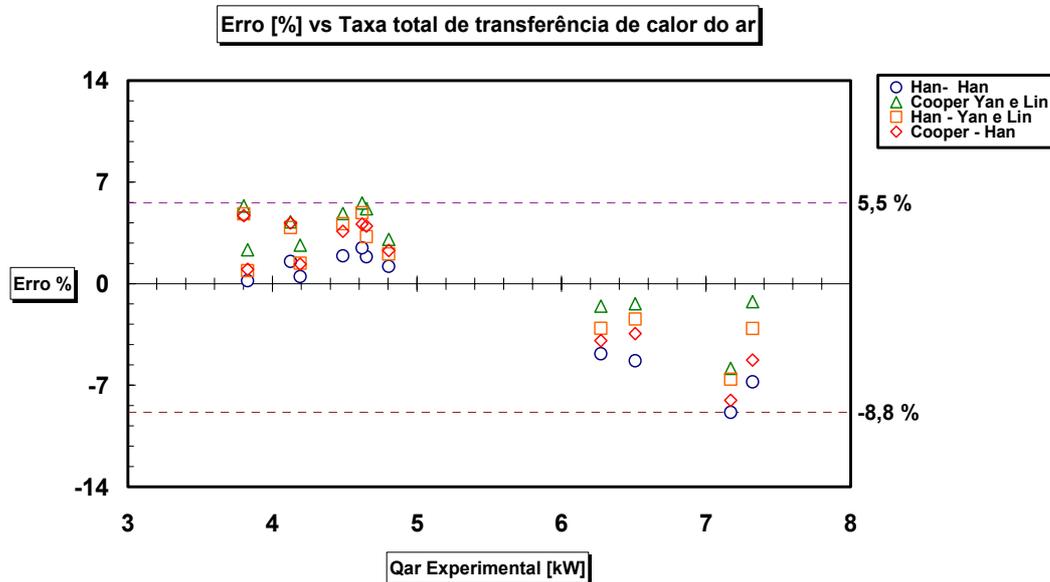


Figura 5.7 – Erro da taxa total de transferência de calor do ar, para o evaporador 1 operando com R134a.

Na figura 5.8, apresenta-se o gráfico de discrepância obtido na simulação da pressão, na saída do refrigerante R134a, versus vazão mássica do mesmo. Pode-se observar que, para vazões mássicas acima de 0,05 kg/s, a magnitude do erro aumenta. Percebe-se, também, idêntico resultado na figura 5.9. Uma possível explicação para o fenômeno apresentado é que não se leva em conta, no presente modelo, a queda de pressão no distribuidor (header) e na placa devido à mudança de passo.

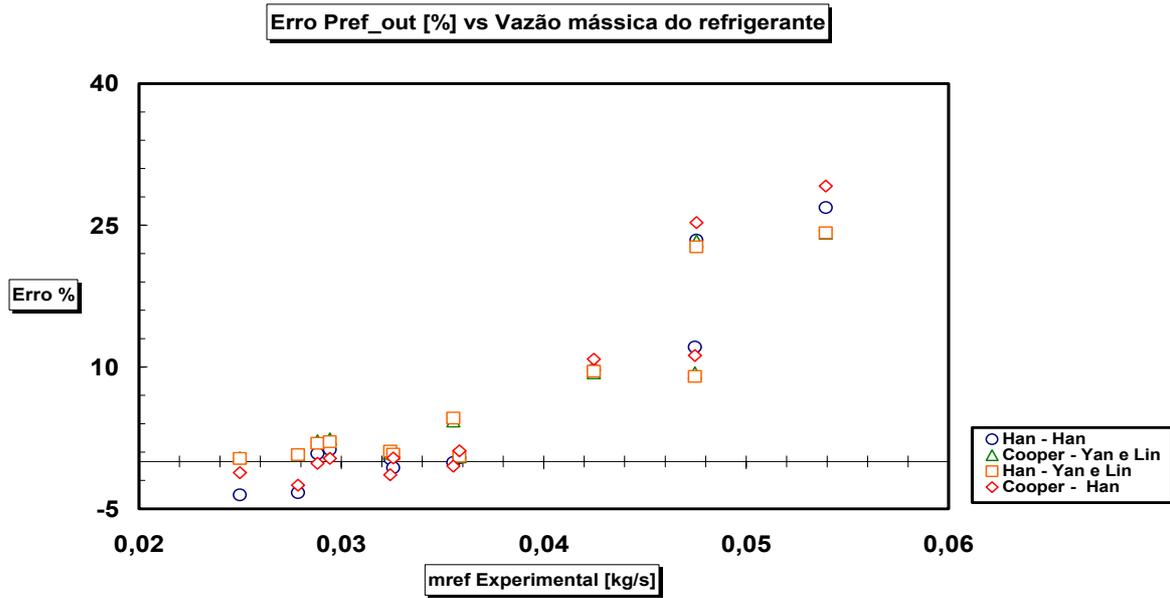


Figura 5.8 – Erro relativo na pressão na saída do refrigerante R134a versus a vazão mássica experimental para o evaporador 1.

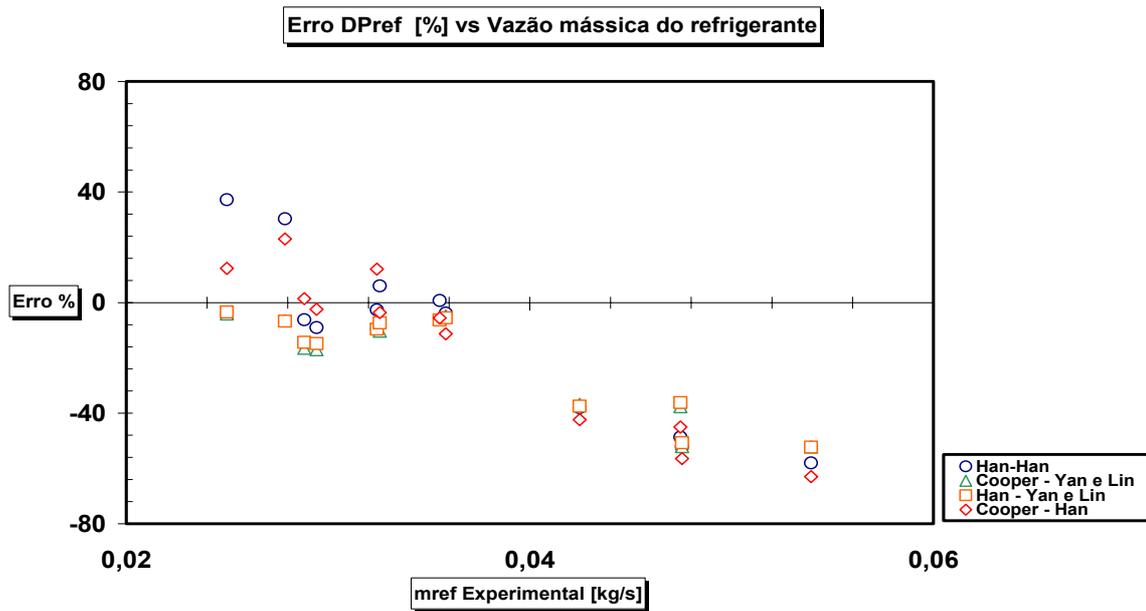


Figura 5.9 – Queda da pressão do refrigerante R134a versus vazão mássica experimental.

Na tabela 5.9 tem-se um resumo dos erros médios das combinações para as correlações de troca de calor e queda de pressão. O erro médio é obtido pela equação (5.2):

$$Erro_{medio}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{caso}} |Erro(\%)|}{N_{casos}} \quad (5.2)$$

onde N_{casos} é o número de casos que são rodados na simulação

Tabela 5.9 – Erro médio das combinações, simulação do evaporador número 1 (R134a).

Erro médio [%]					
Combinações	Refrigerante R134a			Ar	
	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	\dot{Q}_{ref}	$P_{air,out}$	\dot{Q}_{air}
Han-Han	6,87	24,42	4,87	5,17	3,35
Cooper-Yan e Lin	6,26	20,99	4,17	6,53	3,60
Han-Yan e Lin	6,14	20,40	4,15	6,24	3,37
Cooper-Han	7,02	23,22	4,81	6,09	3,82

A tabela 5.9 mostra que os melhores resultados globais são obtidos pela combinação Han-Yan e Lin, a qual mais se aproxima dos dados experimentais.

5.2.2.1.2

Resultados da Simulação do Evaporador Número 1 com o Fluido H.

Nesta simulação os dados da geometria do evaporador número 1 são os mesmos, tão somente mudando-se o refrigerante R134a pelo fluido H.

Na figura 5.10, pode-se observar um erro situado entre 48,1 % (máximo) e -0,3 % (mínimo), correspondentes à simulação usando as quatro combinações já referidas. Observa-se, de forma semelhante à dos casos anteriores, que as combinações de Cooper-Yan e Lin e Han-Yan e Lin, apresentam os melhores resultados.

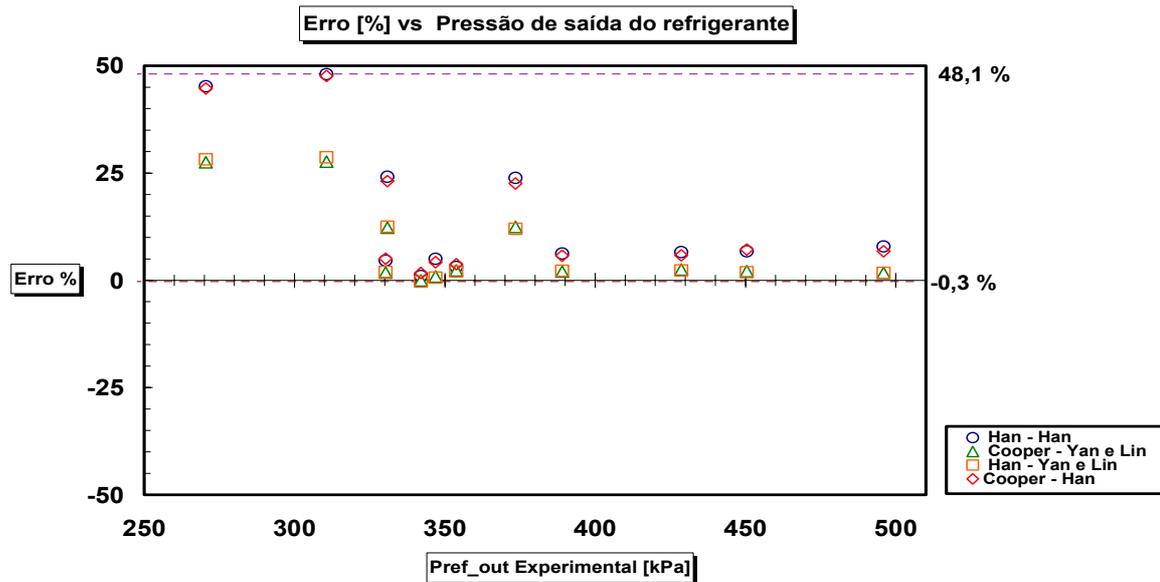


Figura 5.10 – Erro relativo da pressão de saída do refrigerante (Fluido H) comparado com o evaporador 1.

Os resultados da queda de pressão do refrigerante são apresentados na figura 5.11. Observa-se que os maiores erros da simulação são estimados pela combinação Han-Han e Cooper-Han, com um erro mínimo de -88,4 %. Por outro lado, as combinações de Cooper-Yan e Lin e Han-Yan e Lin mostram um melhor resultado, com erro máximo de 2,6%. A figura 5.12 mostra a discrepância de temperatura do refrigerante na saída, que varia entre 4,4 °C e -4,2 °C.

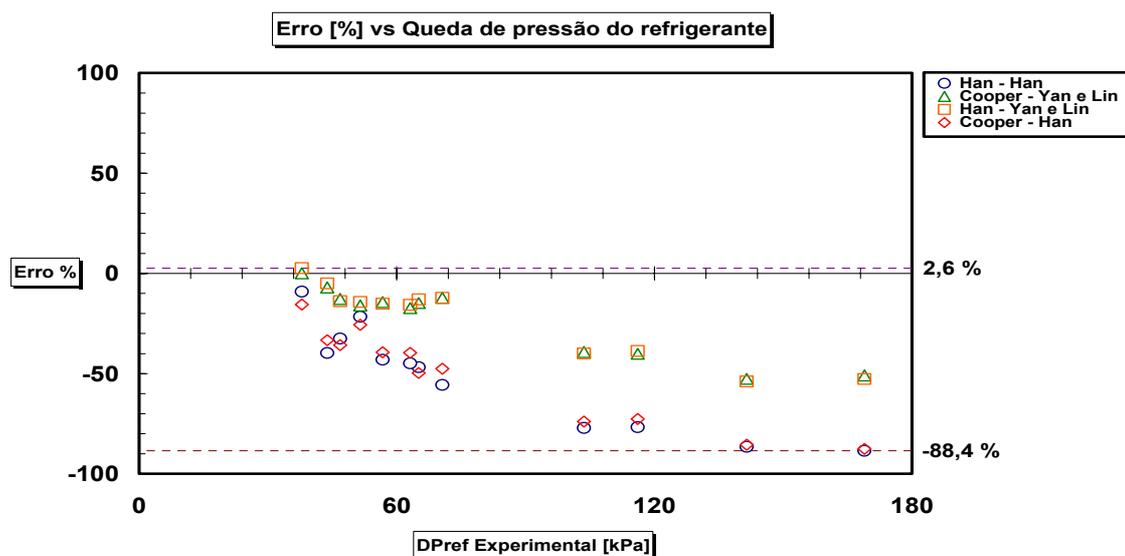


Figura 5.11- Erro relativo da queda de pressão do refrigerante (Fluido H), com o evaporador 1.

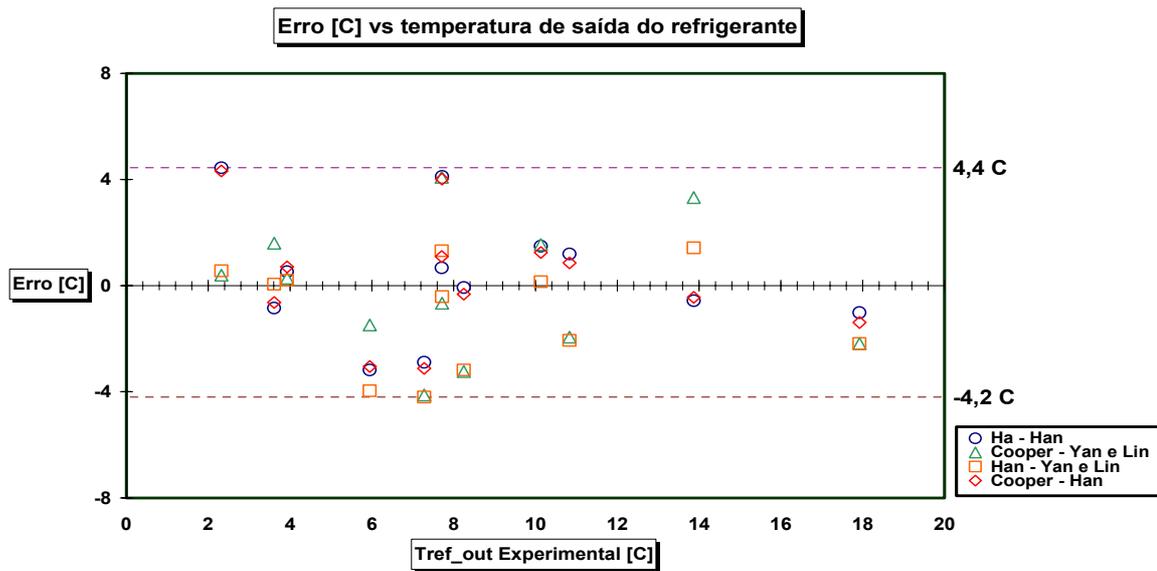


Figura 5.12 – Erro em (°C) da temperatura de saída do refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.

Na figura 5.13, observa-se que a melhor aproximação da simulação ocorre com a combinação das correlações de Cooper-Yan e Lin, cujos resultados ficam muito próximos dos experimentais, para a taxa de transferência de calor do refrigerante (\dot{Q}_{ref}).

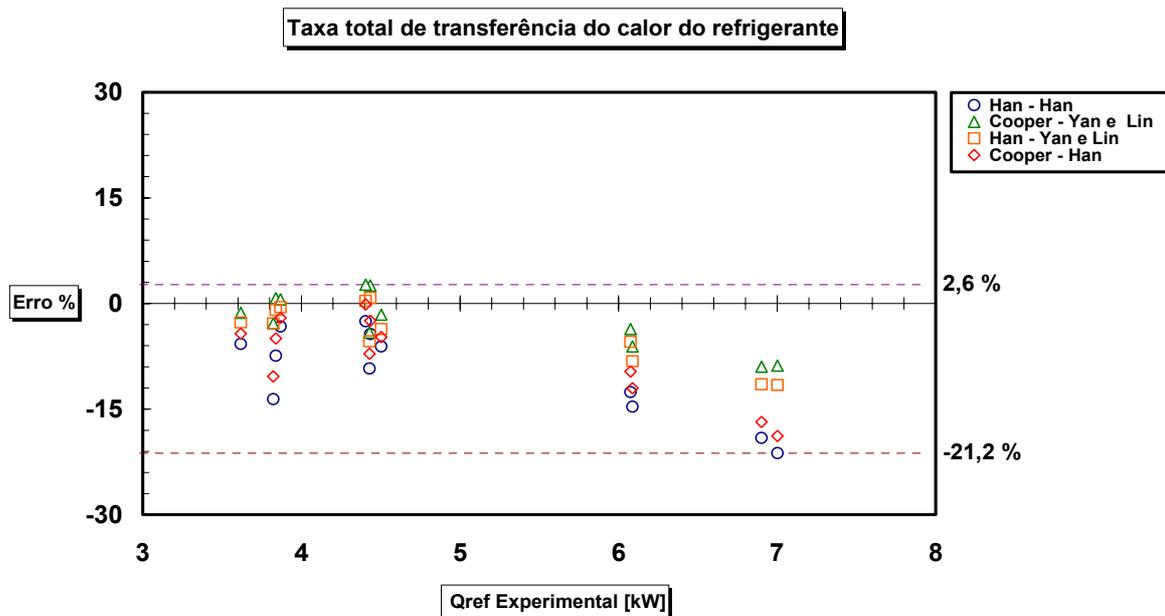


Figura 5.13 – Erro relativo da taxa de transferência de calor para o refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.

Os resultados apresentados nas figuras de 5.14 e 5.15 são para a queda de pressão e para a temperatura de saída do ar. Da mesma forma que na simulação com R134a, as condições de queda de pressão do ar dependem, principalmente, da geometria das aletas. A incerteza na medida das dimensões da aleta pode levar a uma discrepância entre os resultados numéricos e experimentais. Para a temperatura na saída do ar tem-se um comportamento muito semelhante, independentemente das combinações de correlações utilizadas.

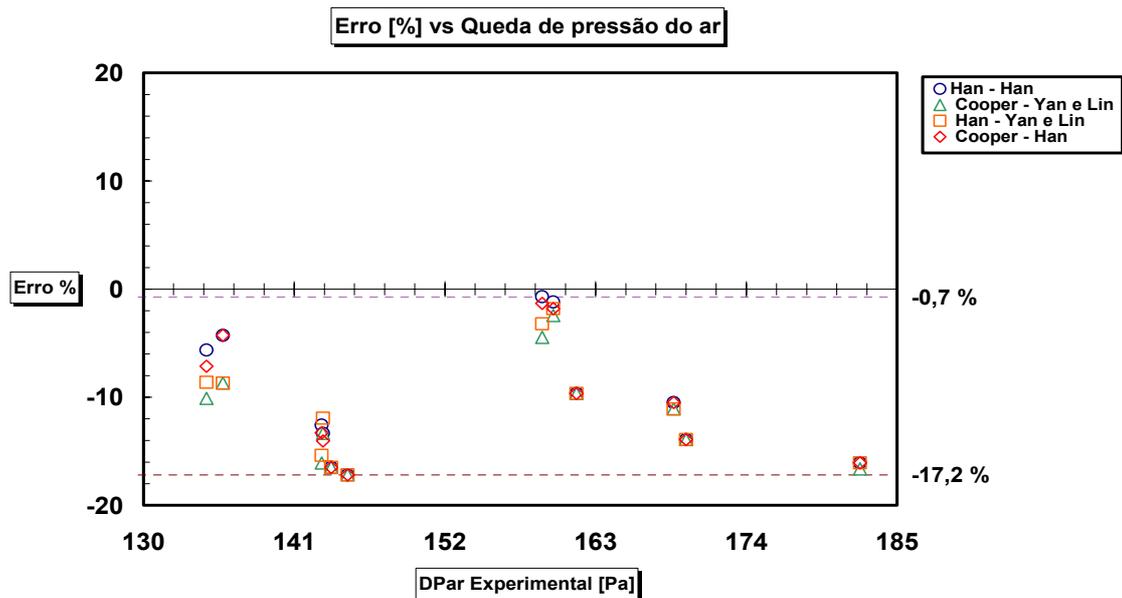


Figura 5.14 – Erro relativo da queda de pressão do ar (Fluido H), com o evaporador 1.

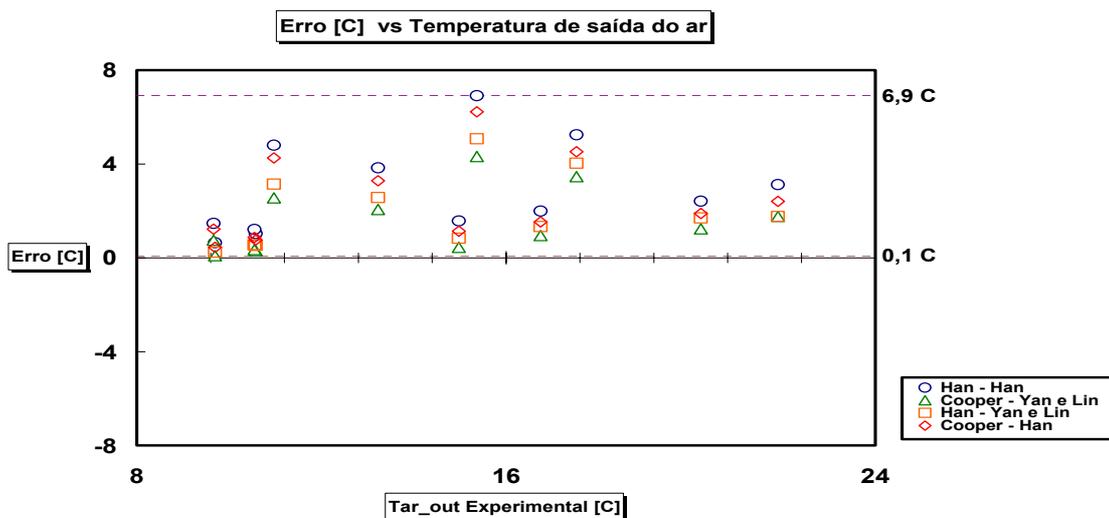


Figura 5.15 - Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (Fluido H), com o evaporador 1.

No gráfico 5.16, apresentam-se os resultados para a taxa de transferência de calor do lado do ar. Pode-se observar que a melhor combinação é a de Cooper-Yan e Lin, onde os resultados encontram-se próximos aos valores experimentais.

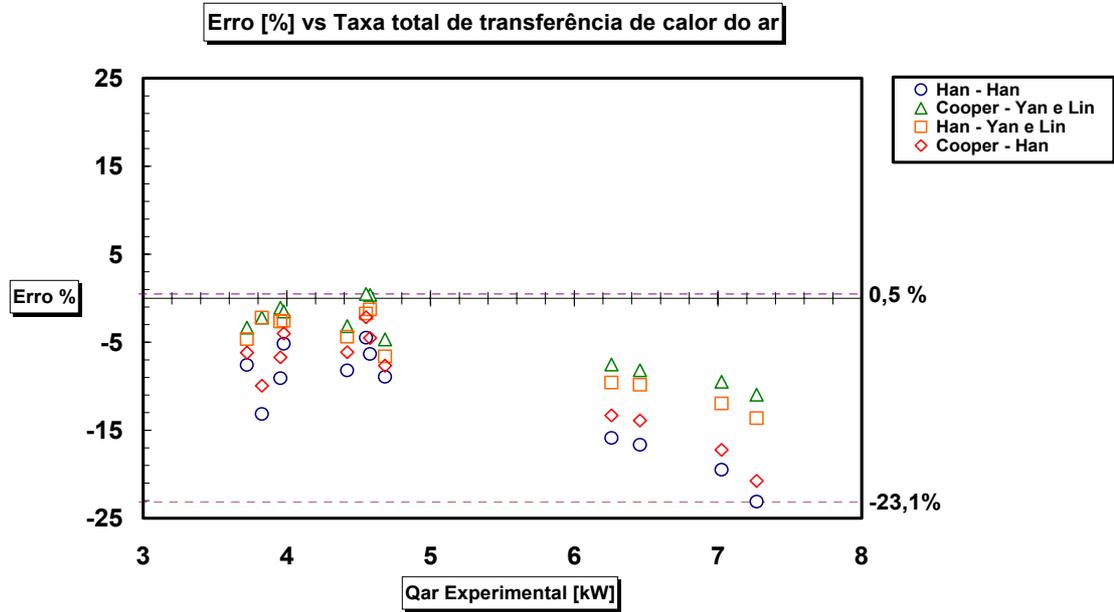


Figura 5.16 - Erro em (%) da taxa total de transferência de calor do ar (Fluido H), com o evaporador 1.

Na figura 5.17 pode-se observar que o erro da pressão na saída do refrigerante (Fluido H), para vazões mássicas acima do 0,05 kg/s, tende a aumentar. O mesmo fenômeno acontece com a queda de pressão do refrigerante, apresentada na figura 5.18. Esta tendência pode ocorrer devido ao fato de não serem adicionadas a queda de pressão do distribuidor de refrigerante a queda de pressão devido à mudança de passo.

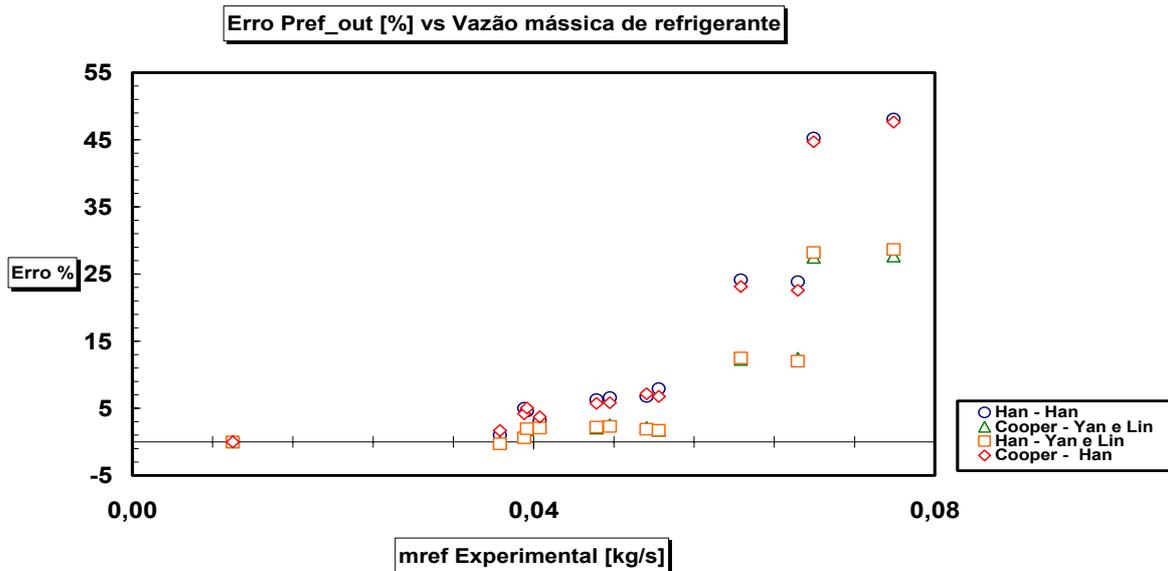


Figura 5.17 – Erro da pressão do refrigerante (Fluido H) na saída versus vazão mássica experimental para o evaporador 1.

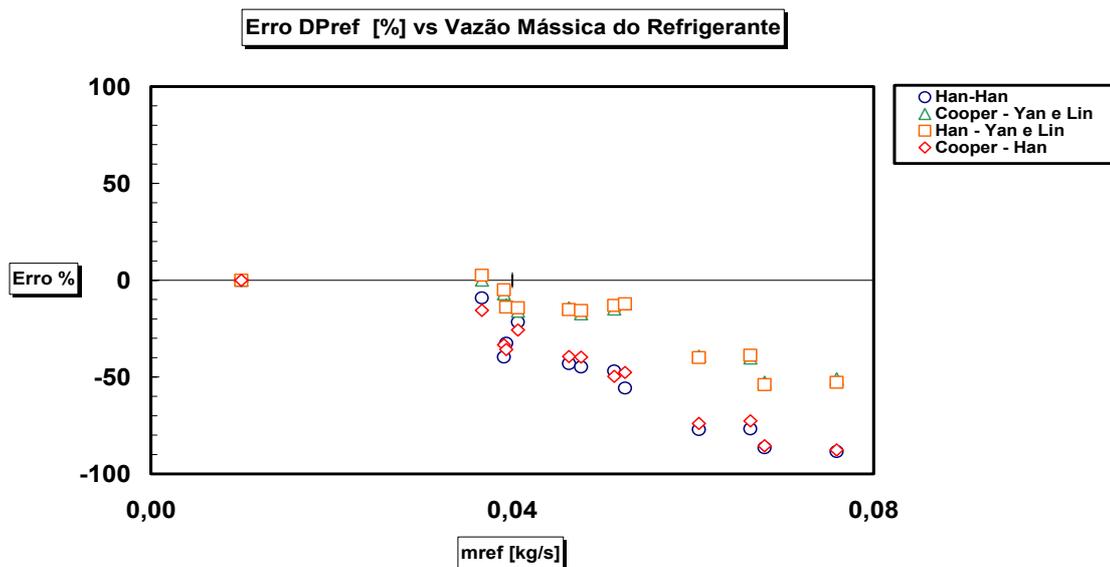


Figura 5.18 – Erro da queda da pressão do refrigerante (Fluido H) versus vazão mássica experimental, para o evaporador 1.

O resultado do cálculo dos erros médios das combinações obtidos mediante a equação (5.2) são apresentados na tabela 5.10. Pode-se observar que as simulações que usam a combinação das correlações de Han-Han e Cooper-Han apresentam erro médio maior do que o correspondente as combinações que usam

Han-Yan e Lin e Cooper-Yan e Lin, sendo a última combinação a melhor opção na simulação do trocador de calor (ou seja, a que apresenta o menor erro médio).

Tabela 5.10 – Erro médio das combinações das correlações na simulação do evaporador número 1 para o fluido H.

Erro médio [%]					
Combinações	Fluido H			Ar	
	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	\dot{Q}_{ref}	$P_{air,out}$	\dot{Q}_{air}
Han-Han	15,22	51,84	9,99	10,13	11,51
Cooper-Yan e Lin	7,79	23,11	3,67	11,67	4,42
Han-Yan e Lin	7,87	23,08	4,49	10,47	5,92
Cooper-Han	14,86	50,52	7,80	10,47	9,38

A tabela 5.10 apresenta resultados semelhantes aos simulados com o refrigerante R134a, mostrando-se que a combinação de Han-Yan e Lin e Cooper-Yan e Lin, garantem os melhores resultados.

5.2.2.2 Simulação Numérica do Evaporador Número 2.

Os dados de entrada para a simulação do evaporador número 2 são apresentados na tabela 5.11 e, da mesma forma que no caso anterior (evaporador 1), os dados da geometria da placa, das aletas e a circuitagem do evaporador permanecem constantes, mudando somente as condições de operação do refrigerante e do ar.

Tabela 5.11 – Condições de operação iniciais (refrigerante – ar) do evaporador número 2.

Dados gerais		
Altura da placa	0,1968	[m]
Comprimento da placa	0,062	[m]
Número de divisões da placa	15	[-]
Número de passos	2	[-]
Refrigerante	R134a	[-]
Condutividade térmica da placa	0,2093	[kW/m-k]
Condutividade térmica da aleta	0,2093	[kW/m-k]
Geometria da placa		
Espaço médio do canal	1,35E-3	[m]
Taxa longitude desenvolvida e projetada	1,18	[-]

Espessura da placa	0,5E-3	[m]
Passo do canal	3E-3	[m]
Ângulo do corrugado	70	[Grados]
Número de canais	6	[-]
Geometria da aleta		
Altura da aleta	9,6E-03	[m]
Passo da aleta	1,25E-03	[m]
Espessura da aleta	0,04E-05	[m]
Passo da persiana	1,1E-03	[m]
Comprimento da persiana	6,8E-03	[m]
Ângulo da persiana	25,5	[Grados]
Evaporador número 2		
Seleção das correlações		
Correlação de troca de calor - refrigerante	1 ou 2	
Correlação de queda de pressão - refrigerante	1 ou 2	
Circuitagem		
Número de tanques	3	
Condição de ingresso no 1er tanque (A ou B)	B	
Número de placas por tanque		
Placas do tanque 1	6	
Placas do tanque 2	7	
Placas do tanque 3	8	
Placas do tanque 4	0	

Os refrigerantes utilizados na simulação do evaporador são o R134a e o fluido 1234yf. As condições de operação do R134a são obtidas das tabelas 5.5 e 5.6.

5.2.2.2.1

Resultados da Simulação do Evaporador Número 2 operando com o Refrigerante R134a.

A análise desenvolvida para a simulação do evaporador número 2 segue o mesmo padrão da utilizada no caso do evaporador número 1. Apresentam-se os gráficos de erro relativo (%) da simulação versus as variáveis a serem analisadas, a saber: pressão de saída, temperatura de saída e taxa de transferência de calor do lado do refrigerante e do ar. As combinações das correlações de troca de calor e queda de pressão são extraídas da tabela 5.7.

No gráfico 5.19, pode-se observar que o erro relativo das quatro combinações oscila entre 5,5 % (máximo) e -10,3% (mínimo), apresentando os melhores resultados as combinações das correlações de Cooper-Yan e Lin e Han-Yan e Lin.

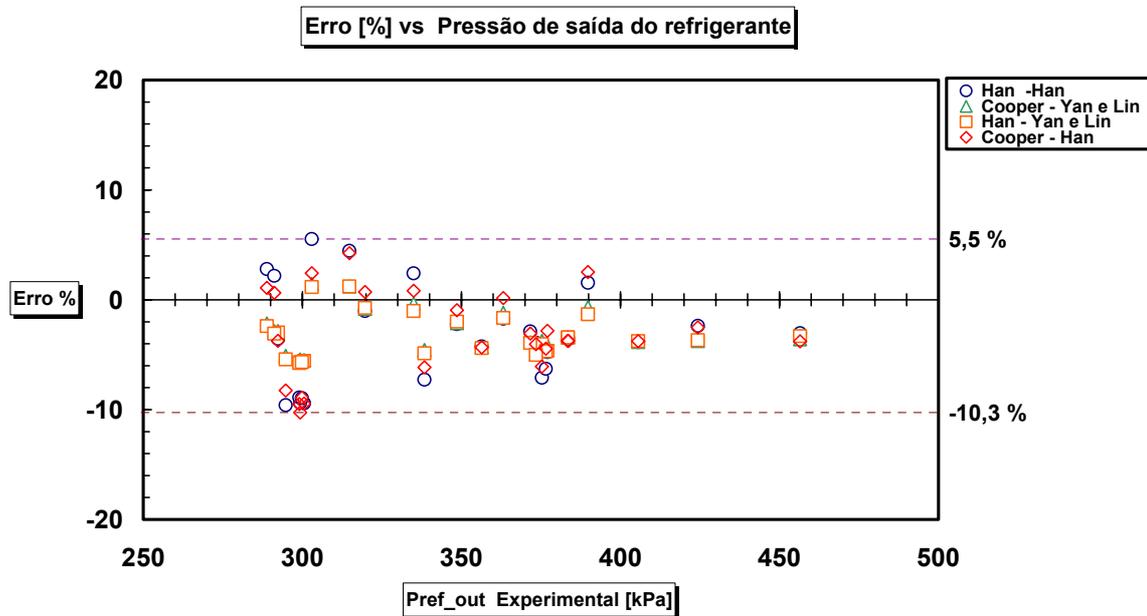


Figura 5.19 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do refrigerante (R134a), com o evaporador 2.

A análise dos resultados da simulação da queda de pressão do lado do refrigerante para o evaporador número 2 manifesta uma tendência ao incremento do erro a valores muito altos, para quedas de pressões muito pequenas. Isto pode ser devido a não se considerar a queda de pressão na mudança de passo e do distribuidor do refrigerante (header). A incerteza experimental, também, pode ser grande para pequenas quedas de pressão. Isto pode ser observado na tabela 5.5 de dados experimentais e no gráfico 5.20. A figura 5.21 apresenta a diferença entre as temperaturas calculada e experimental, na saída do refrigerante, ficando delimitada por uma faixa entre 8,8 °C e -3,3 °C .

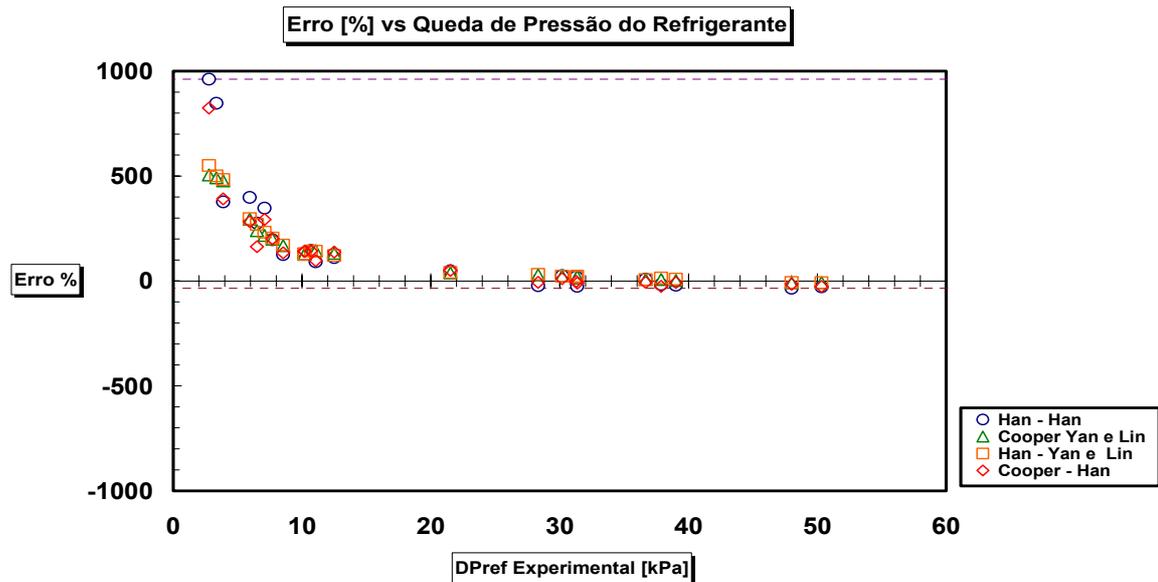


Figura 5.20 – Erro relativo da queda pressão do refrigerante R134a, com evaporador 2.

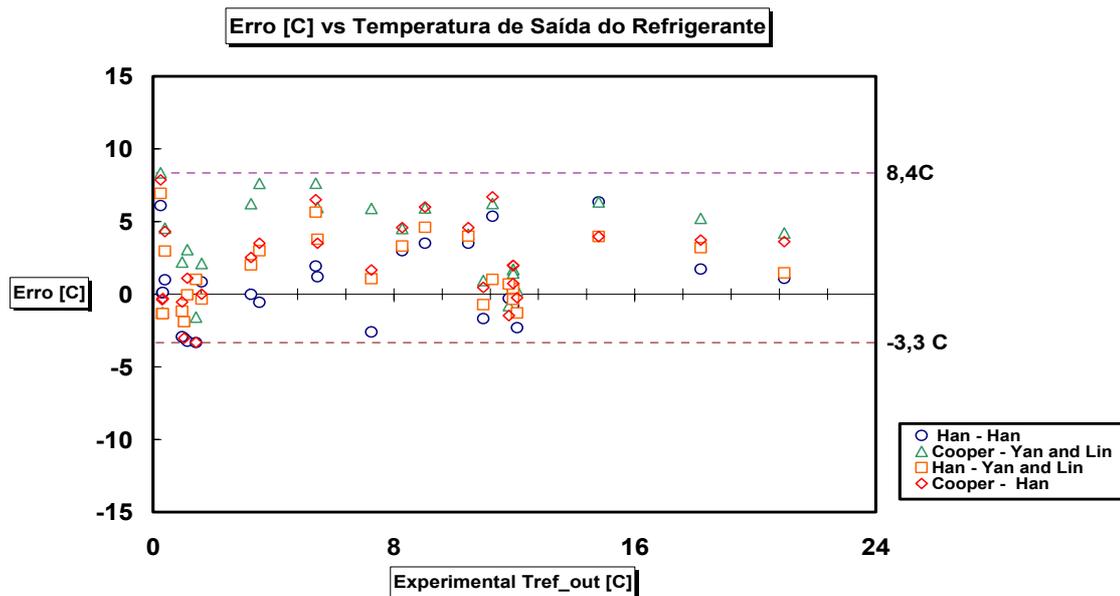


Figura 5.21 – Erro em ($^{\circ}$ C) da temperatura de saída do refrigerante R134a, com o evaporador 2.

Pode-se observar, na figura 5.22, que o erro correspondente à taxa de transferência de calor do lado do refrigerante encontra-se em uma faixa razoável limitada por 5,8% (máximo) e -8% (mínimo), para as quatro combinações de correlações.

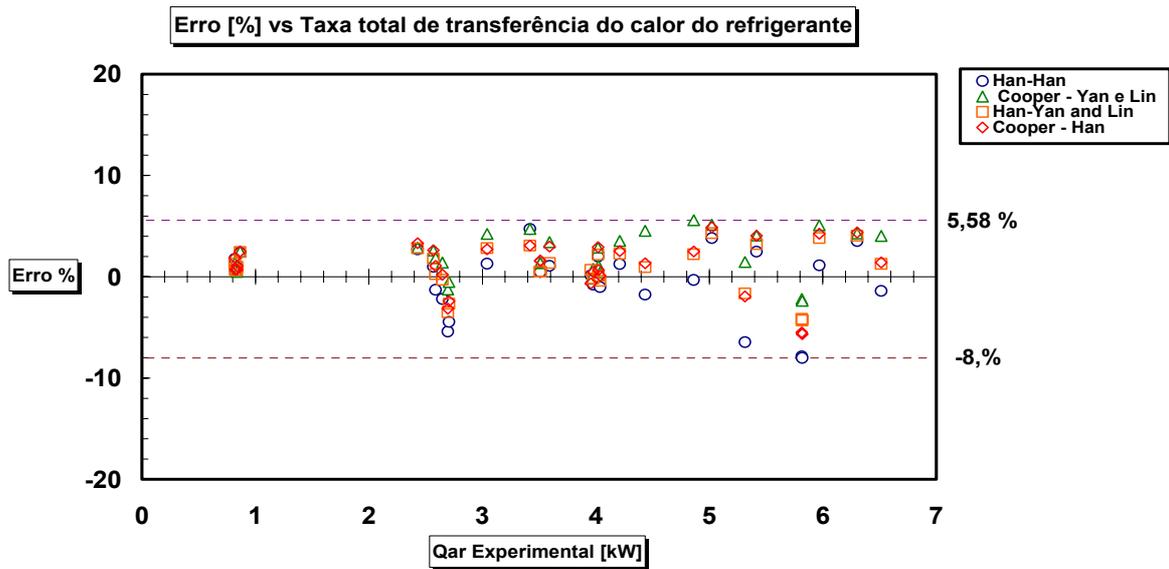


Figura 5.22 – Erro relativo em (%) da taxa de transferência de calor do refrigerante R134a, com o evaporador 2.

A figura 5.23 apresenta o erro de queda de pressão do ar, com uma faixa entre 27% (máximo) e -4,4 % (mínimo) do erro relativo para as quatro combinações. Observa-se, na figura 5.24, o erro da temperatura de saída do ar, o qual se encontra em uma faixa entre 4,4 °C e -1,2 °C, o que pode ser considerado razoável.

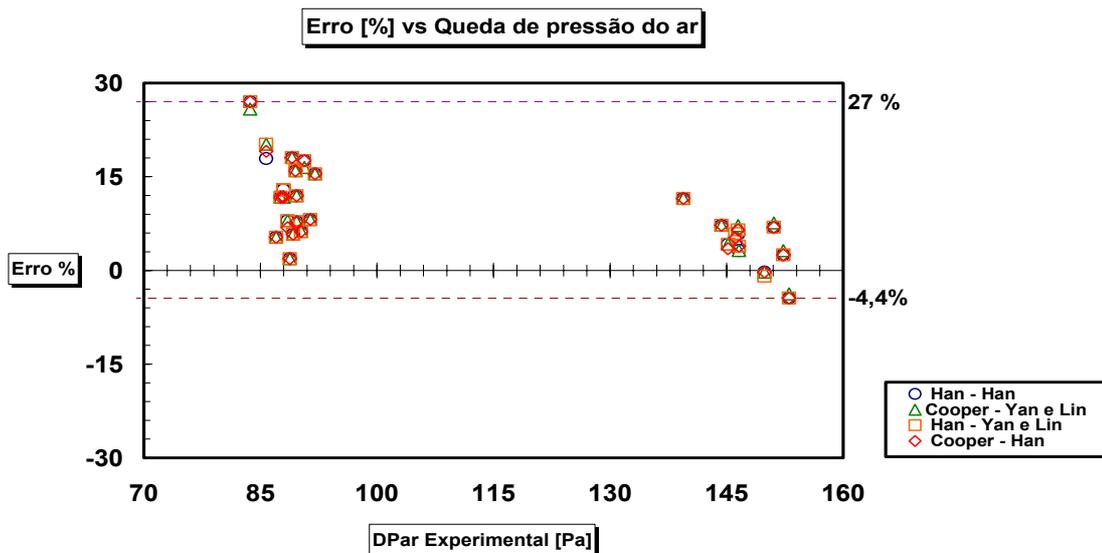


Figura 5.23 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do ar (R134a), com o evaporador 2.

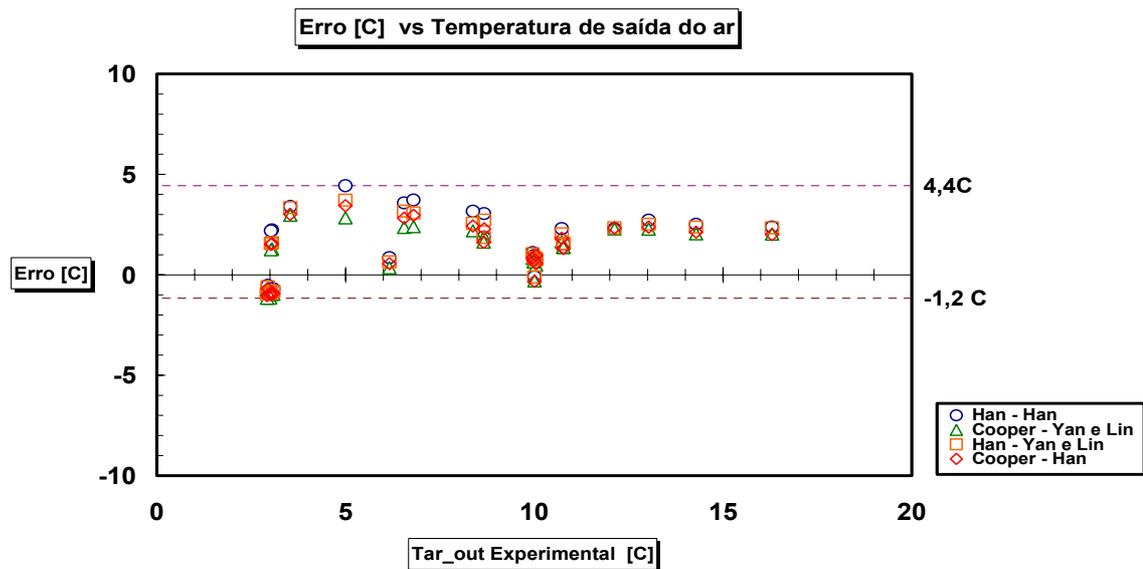


Figura 5.24 - Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (R134a), com o evaporador 2.

A figura 5.25 apresenta a taxa total de transferência de calor do ar, podendo-se observar que, para baixas taxas de transferência de calor, o valor dos erros aumenta. Isto pode ser devido à incerteza de medida nas pequenas vazões mássicas do refrigerante.

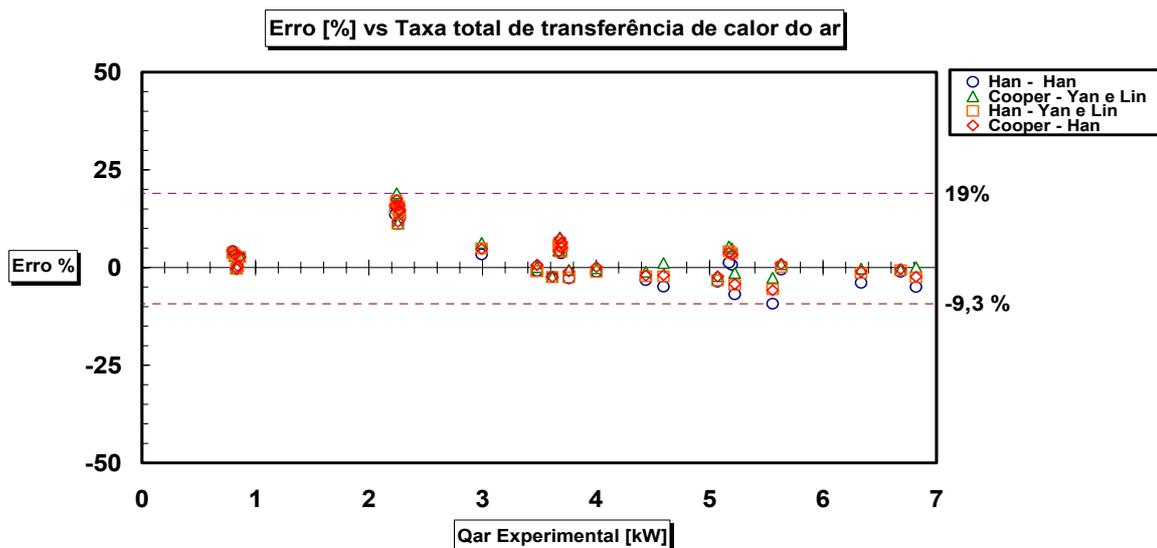


Figura 5.25 - Erro em (%) da taxa total de transferência de calor do ar (R134a), com evaporador 2.

Nas figuras 5.26 e 5.27, são apresentados os valores dos erros relativos correspondentes à pressão de saída e queda de pressão do refrigerante versus a vazão mássica do refrigerante. Observa-se que os erros aumentam para baixas vazões de refrigerante. Este resultado é muito mais evidente no gráfico de queda de pressão, figura 5.27.

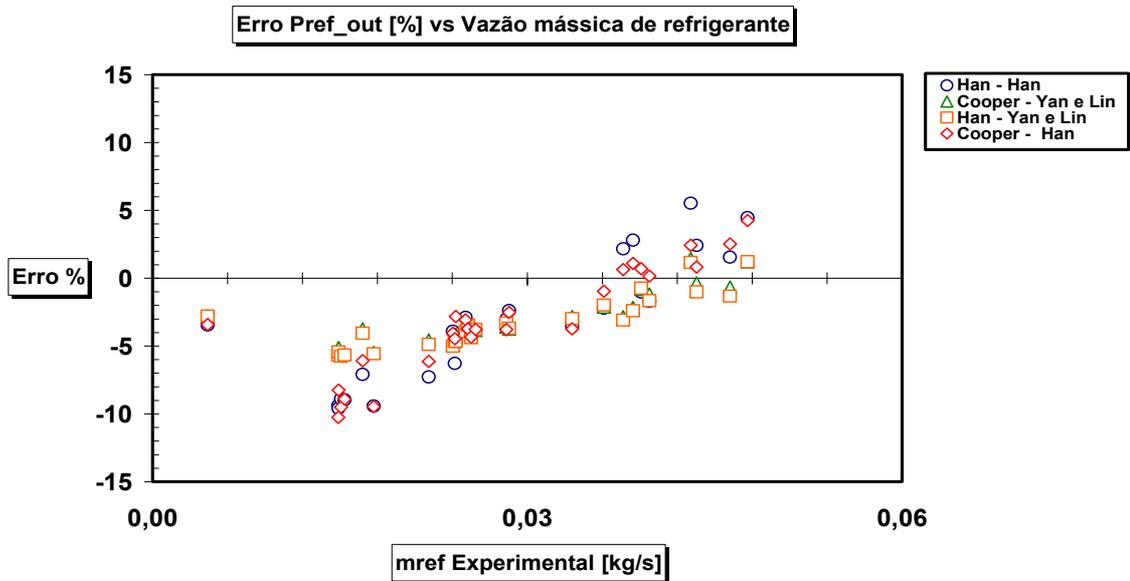


Figura 5.26 – Pressão do refrigerante (R134a) na saída versus vazão mássica experimental, com o evaporador 2.

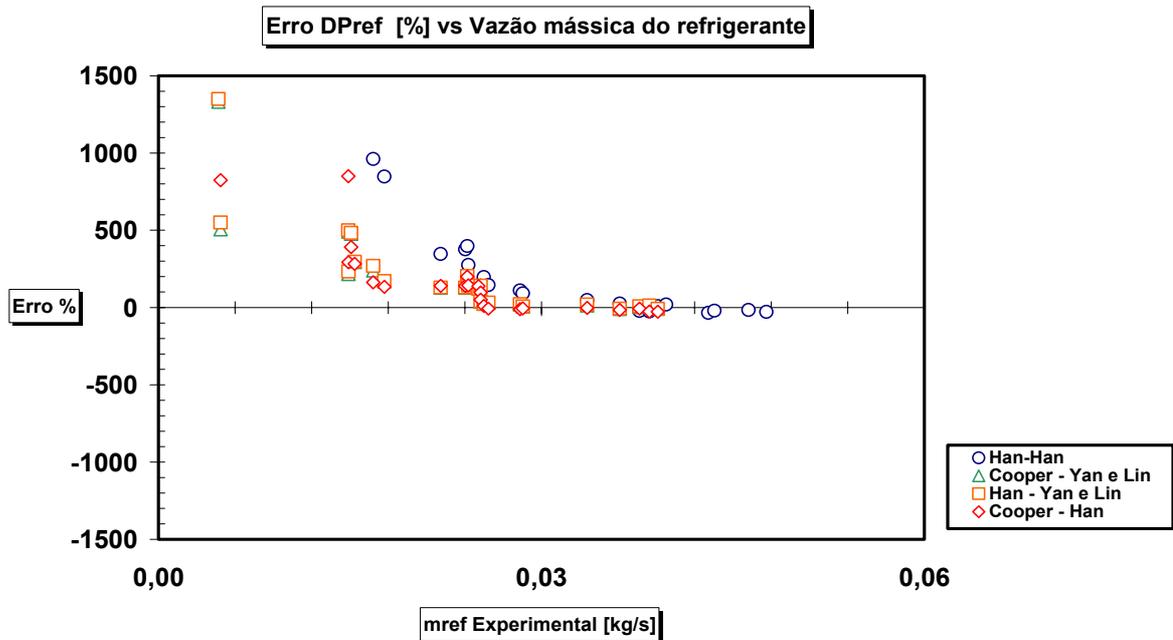


Figura 5.27 – Queda da pressão do refrigerante (R134a) versus vazão mássica experimental, com o evaporador 2.

A tabela 5.12 apresenta os resultados do erro médio da simulação. Pode-se constatar que as correlações de Cooper-Yan e Lin e Han e Yan e Lin são as que melhor se aproximam dos resultados. Entretanto, na queda de pressão do lado do refrigerante, observam-se valores do erros elevados devido ao fato de que para baixas vazões mássicas do refrigerante diminui o valor da queda de pressão, aumentando a incerteza.

Tabela 5.12 – Erro médio das combinações na simulação do evaporador número 2 (R134a).

Erro Médio [%]					
Combinações	Refrigerante R134a			Ar	
	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	\dot{Q}_{ref}	$P_{air,out}$	\dot{Q}_{air}
Han-Han	4,68	190,90	2,48	9,45	5,61
Cooper-Yan e Lin	3,37	149,15	2,53	9,49	4,98
Han-Yan e Lin	3,52	154,46	2,05	9,66	3,56
Cooper-Han	4,15	172,17	2,51	9,41	5,58

5.2.2.2.2

Resultados da Simulação do Evaporador Número 2 operando com o Fluido 1234yf

No gráfico da figura 5.28, pode-se observar o erro relativo da pressão de saída do fluido 1234yf, o qual oscila entre 14,6% (máximo) e -5,4 % (mínimo), a simulação foi conduzida usando as quatro combinações. Observa-se que a melhor combinação, como nos casos anteriores, é a de Cooper-Yan e Lin.

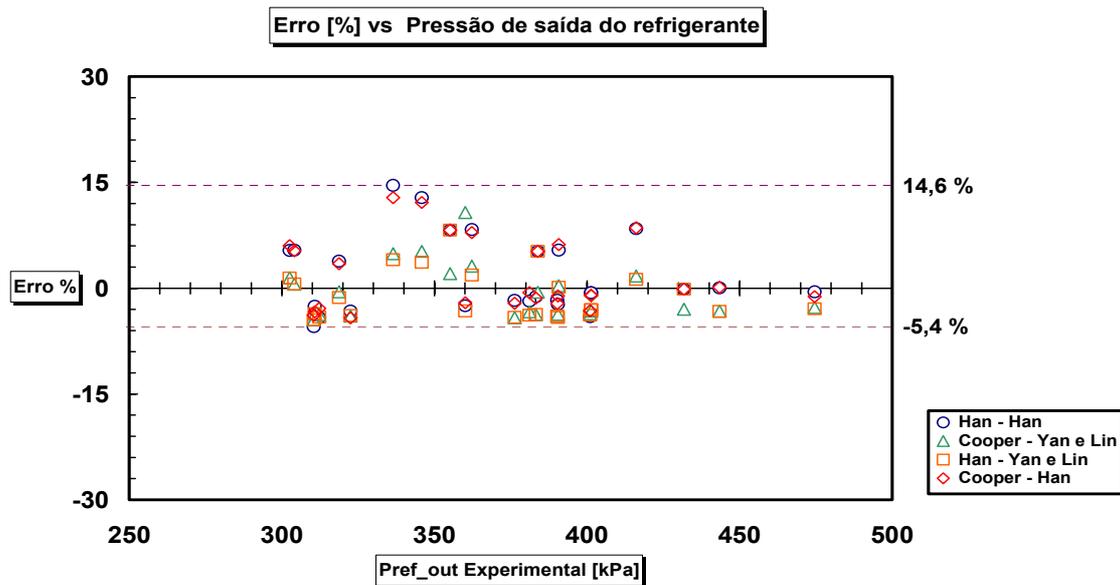


Figura 5.28 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do fluido (1234yf), com o evaporador 2.

De igual forma que na simulação do refrigerante R134a, o fluido 1234yf apresenta erros elevados para quedas de pressão pequenas, como pode ser observado na figura 5.29. O erro da temperatura de saída do fluido 1234yf é também apresentada na figura 5.30.

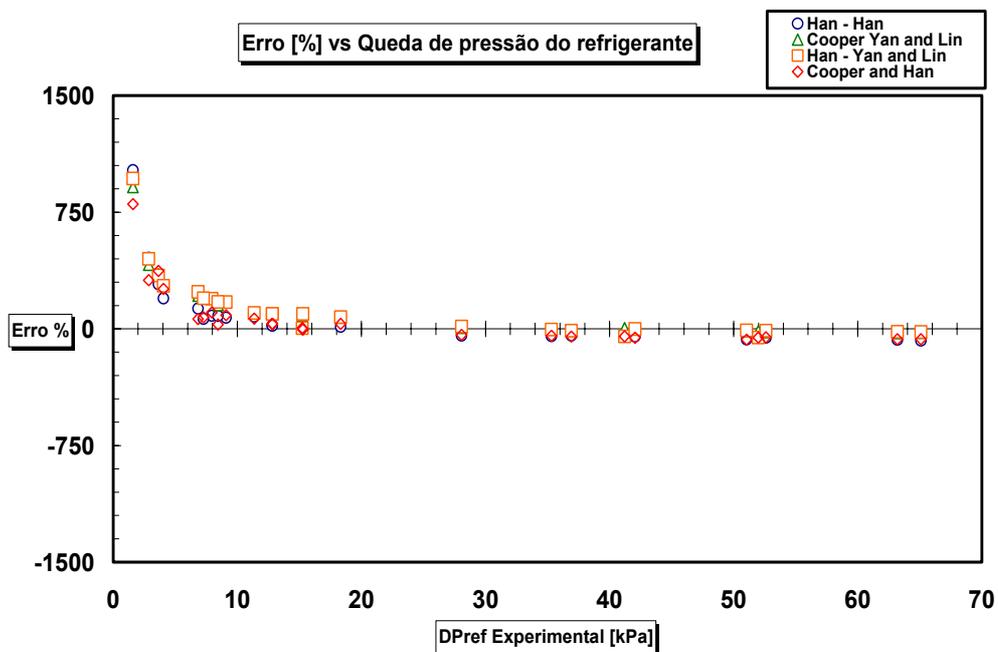


Figura 5.29 – Erro relativo em (%) da queda pressão do fluido (1234yf), com o evaporador 2.

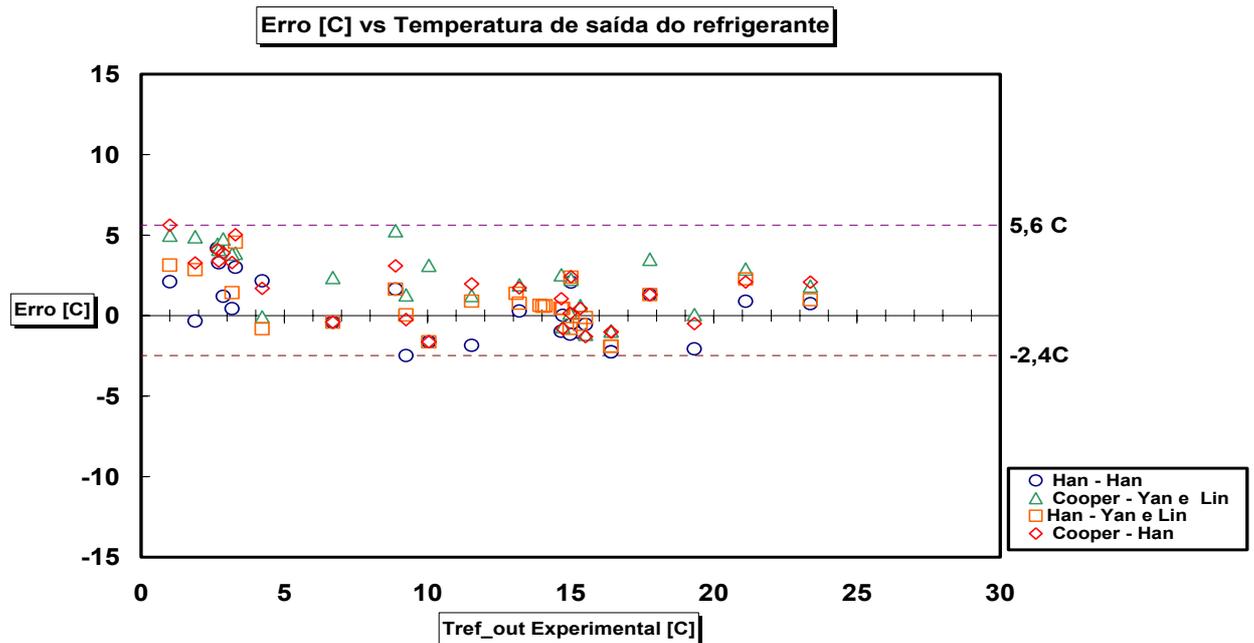


Figura 5.30 – Erro ($^{\circ}$ C) da temperatura de saída do fluido (1234yf), com o evaporador 2.

Os resultados da simulação, no que diz respeito à taxa de transferência de calor, são apresentados na figura 5.31. O erro oscila entre 3,9% e -11%, para as quatro combinações, sendo que as combinações de Cooper-Yan e Lin e Han-Yan e Lin são as de melhor aproximação aos dados experimentais.

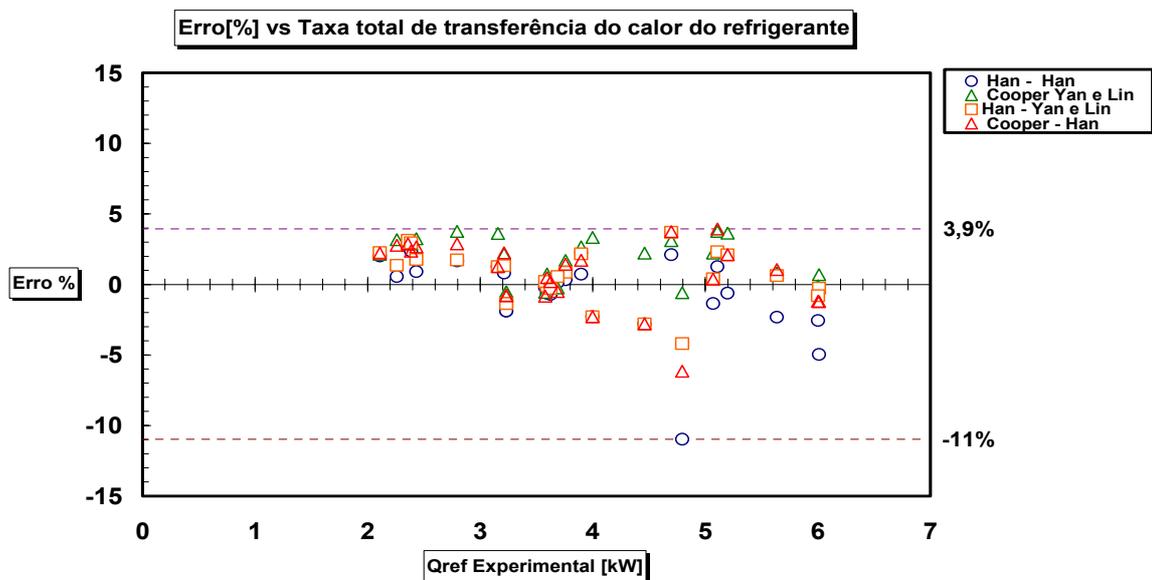


Figura 5.31 – Erro relativo em (%) da taxa de transferência de calor do refrigerante (1234yf), com o evaporador 2.

Os resultados da simulação do lado do ar são apresentados nas figuras 5.32 e 5.33, para queda de pressão e temperatura na saída do ar, onde se observa que os erros da simulação são pequenos, obtendo-se valores próximos aos dados experimentais.

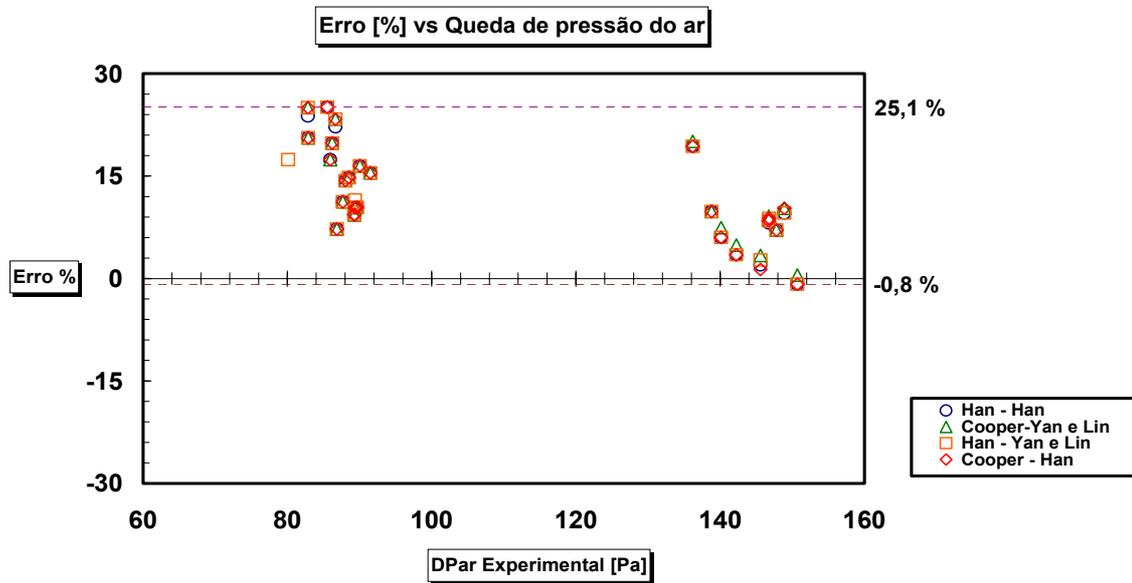


Figura 5.32 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do ar (1234yf), com o evaporador 2.

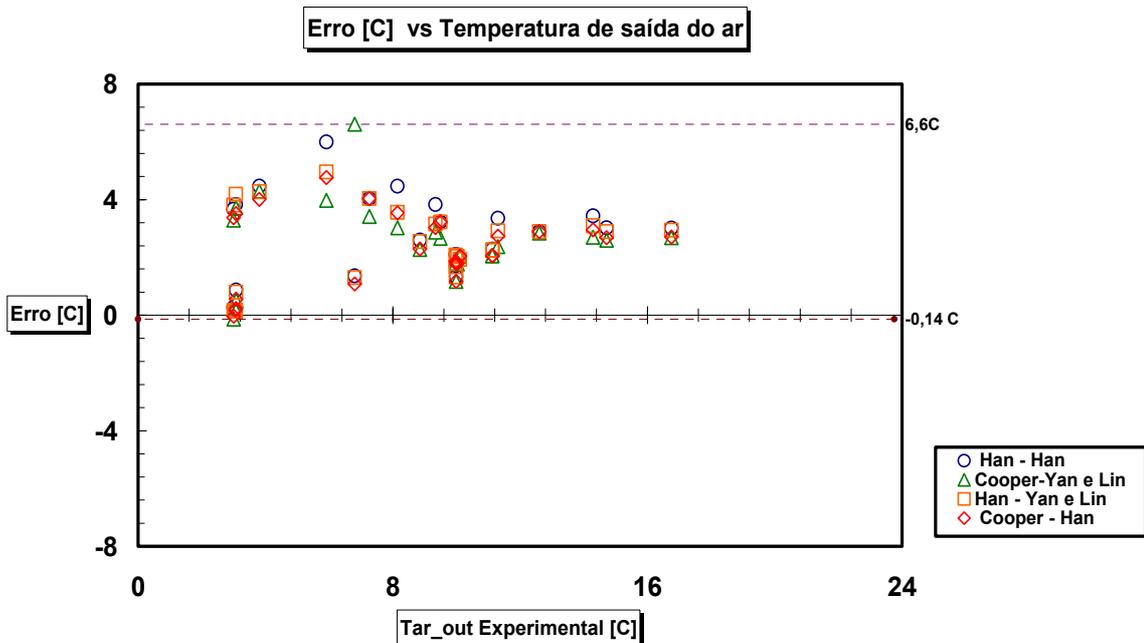


Figura 5.33 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (1234yf), com o evaporador 2.

Na figura 5.34, apresentam-se os erros para a taxa de transferência de calor do ar, os quais se encontram entre 8,2 % e -19,7%.

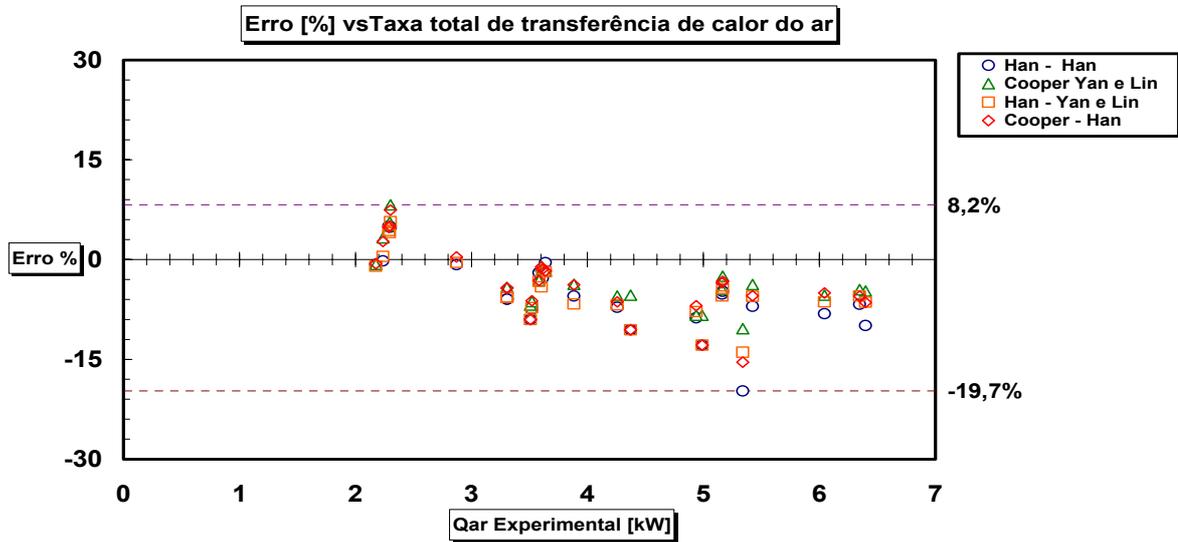


Figura 5.34- Erro da taxa total de transferência de calor do ar (1234yf), com o evaporador 2.

Nas figuras 5.35 e 5.36, pode-se observar que o erro, correspondente à pressão de saída e a queda de pressão do lado do refrigerante, aumenta com vazões mássicas pequenas, como aconteceu na simulação anterior, com o R134a.

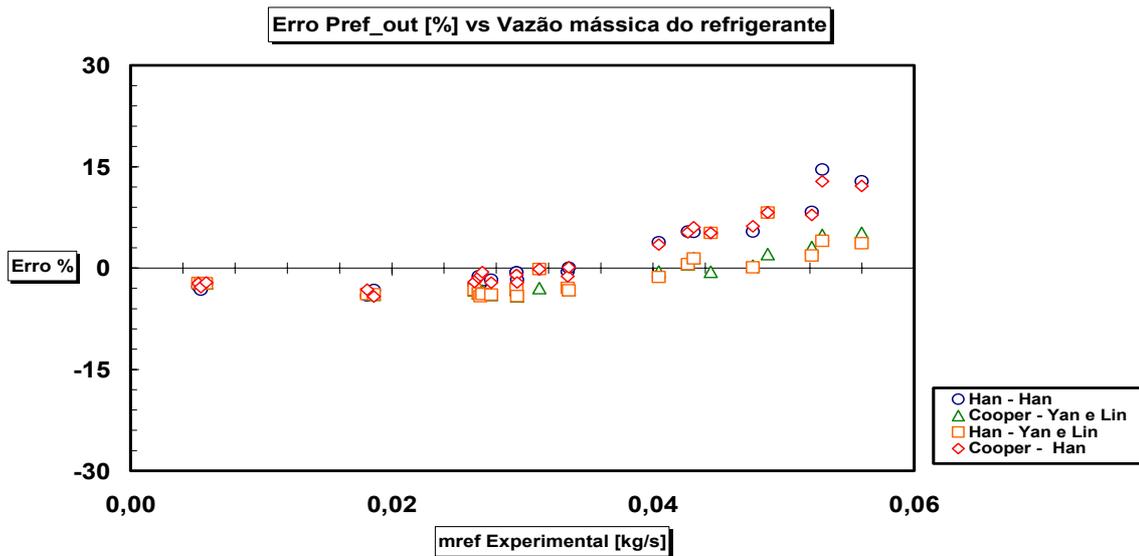


Figura 5.35 – Pressão do refrigerante (1234yf) na saída versus vazão mássica experimental, com o evaporador 2.

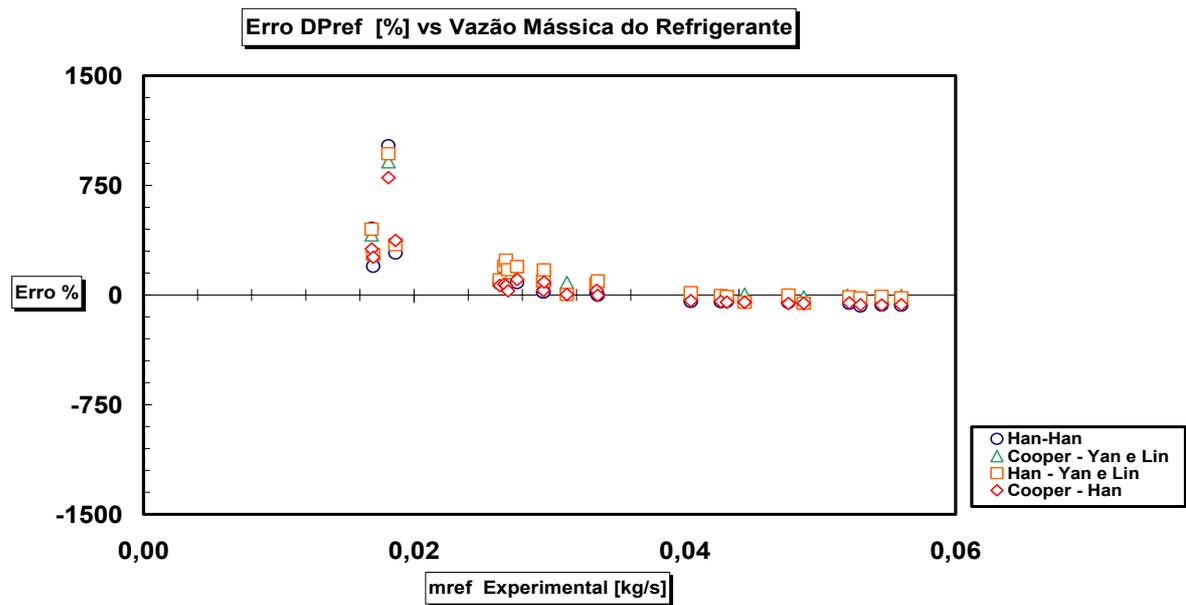


Figura 5.36 – Queda de pressão do refrigerante (1234yf) versus vazão mássica, com o evaporador 2.

A tabela 5.13 apresenta os erros médios da simulação do trocador de calor usando o fluido 1234yf. Pode-se observar que as combinações, de forma geral, apresentam erros elevados no que diz respeito à queda de pressão e pressão na saída do fluido e, da mesma forma que a simulação com o refrigerante R134a, a isto pode ser atribuído o fato de que, para vazões pequenas, as incertezas das medições aumentam consideravelmente.

Tabela 5.13 – Erro médio das combinações na simulação do evaporador número 2 (1234yf), com o evaporador 2.

Combinações	Erro Médio [%]				
	Fluido 1234yf			Ar	
	$P_{ref,out}$	ΔP_{ref}	\dot{Q}_{ref}	$P_{air,out}$	\dot{Q}_{air}
Han-Han	4,27	371,18	1,97	12,56	6,06
Cooper-Yan e Lin	3,05	353,38	2,03	15,01	6,43
Han-Yan e Lin	3,27	362,70	1,68	12,74	5,58
Cooper-Han	4,07	288,25	1,98	12,67	5,23

5.2.3 Conclusões

De um modo geral, na simulação dos evaporadores 1 e 2, com os refrigerantes R134a, fluido H e fluido 1234yf, as combinações de correlações que mais se aproximarem dos dados experimentais foi a de Han-Yan e Lin e Cooper-Yan e Lin.