4.
Validação do modelo

4.1.Introdução

Os resultados obtidos de um programa de simulação devem ser comparados com informação experimental disponível literatura ou com resultados de outros autores para garantir, desta forma, a correção do trabalho que se está desenvolvendo.

Para validar o modelo, considerando o consumo energético, escolheu-se, em primeira instância, um trabalho teórico realizado por Kazachki (2007) que foi elaborado para a U.S. Environmental Protection Agency: Stratospheric Protection Division (EPA). Nele realiza-se uma comparação entre opções de supermercados trabalhando com R404A como fluido refrigerante nos sistemas de expansão direta e com Dynalene® HC-30 como fluido secundário. O autor (Kazachki, 2007) considera uma carga térmica de refrigeração de 87,84 kW (300.000 Btu/h) para baixa temperatura e, para média temperatura, 251,52 kW (859.079 Btu/h), valores que correspondem a um supermercado típico com uma área de 3716,12 m^2 (40.000 pés quadrados).

Para o sistema cascata utilizou-se o trabalho desenvolvido por Sawalha (2008). Neste trabalho foi feita uma análise experimental utilizando Amônia e CO_2 como fluidos de alta e baixa temperatura, respectivamente. O trabalho foi realizado sob alguns parâmetros de temperatura que serão mencionados mais adiante. Porém, no final do estudo, obteve-se o COP experimental tanto para o sistema de alta como para de baixa temperatura, que serão comparados com os parâmetros obtidos com o programa aqui desenvolvido.

Igualmente, comparou-se também os resultados do presente trabalho com os cálculos do TEWI e o LCCP obtidos com o trabalho da empresa Arthur D. Little (2002). A referida empresa trabalhou considerando condições de funcionamento, com a taxa de vazamentos anuais de 15% para sistemas de expansão direta e de 2%, para sistemas com fluido secundário. Aquele trabalho

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

também faz uma estimativa da massa total de refrigerante (R404A e R507A) no supermercado, considerando a área do supermercado para determinar a massa total de refrigerante do supermercado, a seguir na equação (4.1):

$$\beta \left[\frac{kg}{m^2}\right] \times A_{SUP}\,[m^2] = m_{SUP}[kg] \tag{4.1}$$

onde β toma o valor de 0,29 para os sistemas de expansão direta e 0,03 para os sistemas com fluido secundário (Arthur D. Little, 2002).

Nesta validação não foram editadas comparações com resultados experimentais para o consumo anual energético dos sistemas de refrigeração pelo fato de que, normalmente, as medições de campo são feitas com um elevado grau de incerteza, o que não garantiria um bom padrão de comparação, mas sim, para a determinação do COP. Os dados experimentais só poderiam ser levados em consideração se tivessem sido medidos em condições de laboratório, o seria complexo de se obter para as condições pretendidas.

4.2. Validação do modelo desenvolvido

Para a validação do modelo desenvolvido no presente trabalho, para valores de consumo energético, comparam-se os resultados aqui obtidos com os resultados do trabalho teórico desenvolvido por Kazachki (2007). Para o sistema cascata, compararam-se os resultados do presente modelo com os do trabalho de Sawalha (2008). Finalmente, para o impacto ambiental, foi feita a comparação com o trabalho da empresa Arthur D. Little (2002).

4.2.1. Comparação com o trabalho teórico de Kazachki (2007) - Simulação do consumo energético dos compressores de um supermercado

Compara-se o consumo de energia em um supermercado que funciona na cidade de Atlanta, estado da Geórgia, Estados Unidos. A comparação realiza-se tanto para o sistema de expansão direta como para o sistema com fluido secundário. O estudo do Kazachki (2007) somente leva em conta o consumo dos compressores do supermercado, critério este que também será considerado nesta primeira avaliação. O presente modelo utiliza valores de eficiência volumétrica e eficiência isentrópica constantes para todas as condições de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

operação. Estes valores são normalmente determinados experimentalmente pelo qual considerou-se uma eficiência volumétrica de 1 e uma eficiência isentrópica de 0,6. Este valor de eficiência isentrópica foi utilizado como uma primeira aproximação para os cálculos do consumo de potência elétrica nos compressores (Honeywell, 2010).

As condições que são consideradas por Kazachki (2007) para o sistema de expansão direta são específicas para determinado refrigerante e supermercado. Estas condições são apresentadas nas tabelas 6 e 7:

Tabela 6 - Dada geral da simulação (Kazachki, 2007)

Dados Gerais	(Refrigerante R404a)
Locação	Atlanta, Geórgia
Área do Supermercado	4180,6 m^2
Tipo de Sistema	Expansão Direta

Tabela 7 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado (Kazachki, 2007)

Dados de projeto	Baixa Temperatura (LT)	Média Temperatura (MT)
Temp. de saturação na sucção (SST)	-28,9 °C (-20 °F)	-6,7 °C (20 °F)
Temp. de saturação na descarga (SDT)	43,3 °C (110 °F)	43,3 °C (110 °F)
Superaquecimento	36,1 K (65 °R)	13,9 K (25 °R)
Sub-resfriamento Mecânico	10 °C (50 °F)	-
Carga de Refrigeração	87,84 kW (300.000 BTU/h)	251,52 kW (856.079 BTU/h)

Neste trabalho, de modo análogo ao adotado por Kazachki (2007), foram omitidos os seguintes parâmetros de consumo:

- Recuperação de calor e degelo,
- Iluminação das vitrines e rejeição de calor dos aparelhos de ar condicionado,
- Consumo anual de HVAC (condicionamento de ar e ventilação).

Na tabela 8 mostram-se os resultados obtidos no trabalho do Kazachki (2007) que são comparados com os resultados da presente simulação. Simulou-se, então, considerando as mesmas hipóteses simplificadoras e, utilizando o programa desenvolvido, determinaram-se valores muito similares aos obtidos por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Kazachki, mostrados na tabela 9. Porém, é importante ressaltar que a comparação serve para os resultados considerando somente o consumo dos compressores e desprezando os fatores de consumo energético das vitrines.

Tabela 8 – Análise BIN do trabalho de Kazachki (2007) para expansão direta, Atlanta

Temperatura	**Temperatura**	**Sistema BT**	**Sistema MT**	**Total do sistema**	**Freqüência**	**Sistema LT**	**Sistema MT**	**Total Sistema**
Ambiental	**Condensação**	**Potência**	**Potência**	**Potência**	**Horária**	**Energia BIN**	**Energia BIN**	**Energia BIN**
°C (°F)	***°C (°F)***	***kW***	***kW***	***kW***	***h***	***kWh***	***kWh***	***kWh***
38(100)	43(110)	47,04	124,30	171,30	9	4,23E+02	1,12E+03	1,54E+03
35(95)	40(105)	45,75	112,50	158,30	56	2,56E+03	6,30E+03	8,86E+03
32(90)	37(100)	44,51	102,24	146,70	196	8,72E+03	2,00E+04	2,88E+04
29(85)	34(95)	43,07	92,31	135,40	758	3,26E+04	7,00E+04	1,03E+05
26,7(80)	32(90)	42,00	84,09	126,10	768	3,23E+04	6,46E+04	9,68E+04
24(75)	29(85)	40,39	76,64	117,00	1314	5,31E+04	1,01E+05	1,54E+05
21(70)	26,7(80)	39,14	68,75	107.90	885	3,46E+04	6,08E+04	9,55E+04
18(65)	24(75)	37,85	62,27	100,10	1027	3,89E+04	6,40E+04	1,03E+05
15,6(60)	21(70)	36,41	56,35	92,80	790	2,88E+04	4,45E+04	7,33E+04
13(55)	18(65)	36,41	55,79	92,20	673	2,45E+04	3,75E+04	6,21E+04
10(50)	15,6(60)	36,41	55,24	91,60	641	2,33E+04	3,54E+04	5,87E+04
7(45)	13(55)	36,41	54,69	91,10	436	1,59E+04	2,38E+04	3,97E+04
4(40)	10(50)	36,41	54,15	90,60	560	2,04E+04	3,03E+04	5,07E+04
2(35)	10(50)	36,41	54,15	90,60	323	1,18E+04	1,75E+04	2,93E+04
-1(30)	10(50)	36,41	54,15	90,60	181	6,59E+03	9,80E+03	1,64E+04
-4(25)	10(50)	36,41	54,15	90,60	72	2,62E+03	3,90E+03	6,52E+03
-7(20)	10(50)	36,41	54,15	90,60	64	2,33E+03	3,47E+03	5,80E+03
-9(15)	10(50)	36,41	54,15	90,60	7	2,55E+02	3,79E+02	6,34E+02
-12(10)	10(50)	36,41	54,15	90,60	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
-15(5)	10(50)	36,41	54,15	90,60	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo Anual em kWh					8760	3,40E+05	5,94E+05	9,34E+05

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Tabela 9 – Resultados obtidos com o modelo para expansão direta, Atlanta

Temperatura	Temperatura	Sistema BT	Sistema MT	Total do sistema	Freqüência	Sistema LT	Sistema MT	Total Sistema
Ambiental	Condensação	Potência	Potência	Potencia	Horária	Energia BIN	Energia BIN	Energia BIN
°C (°F)	*°C (°F)*	*kW*	*kW*	*kW*	*h*	*kWh*	*kWh*	*kWh*
38(100)	43(110)	49,75	124,67	174,42	0	0.00	0,00E+00	0,00E+00
35(95)	40(105)	48,32	115,11	163,43	0	0.00	0,00E+00	0,00E+00
32(90)	37(100)	46,85	106,19	153,04	16	7,50E+02	1,70E+03	2,45E+03
29(85)	34(95)	45,36	97,83	143,19	172	7,80E+03	1,68E+04	2,46E+04
26,7(80)	32(90)	43,83	89,96	133,79	532	2,33E+04	4,79E+04	7,12E+04
24(75)	29(85)	42,27	82,51	124,78	714	3,02E+04	5,89E+04	8,91E+04
21(70)	26,7(80)	40,68	75,44	116,12	825	3,36E+04	6,22E+04	9,58E+04
18(65)	24(75)	37,40	62,27	99,66	1318	4,93E+04	8,21E+04	1,31E+05
15,6(60)	21(70)	37,40	62,27	99,66	1108	4,14E+04	6,90E+04	1,10E+05
13(55)	18(65)	37,40	62,27	99,66	793	2,97E+04	4,94E+04	7,90E+04
10(50)	15,6(60)	37,40	62,27	99,66	601	2,25E+04	3,74E+04	5,99E+04
7(45)	13(55)	37,40	62,27	99,66	641	2,40E+04	3,99E+04	6,39E+04
4(40)	10(50)	37,40	62,27	99,66	732	2,74E+04	4,56E+04	7,30E+04
2(35)	10(50)	37,40	62,27	99,66	454	1,70E+04	2,83E+04	4,52E+04
-1(30)	10(50)	37,40	62,27	99,66	338	1,26E+04	2,10E+04	3,37E+04
-4(25)	10(50)	37,40	62,27	99,66	276	1,03E+04	1,72E+04	2,75E+04
-7(20)	10(50)	37,40	62,27	99,66	137	5,12E+03	8,53E+03	1,37E+04
-9(15)	10(50)	37,40	62,27	99,66	82	3,07E+03	5,11E+03	8,17E+03
-12(10)	10(50)	37,40	62,27	99,66	21	7,85E+02	1,31E+03	2,09E+03
-15(5)	10(50)	37,40	62,27	99,66	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo Anual em kWh					8760	3,39E+05	5,92E+05	9,31E+05

Na figura 23, mostra-se um gráfico de barras que permite comparar os resultados das simulações para expansão direta em supermercados. Pose-se concluir entre os resultados de Kazachki (2207) e os do presente trabalho, decorrente de modelos semelhantes para os compressores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

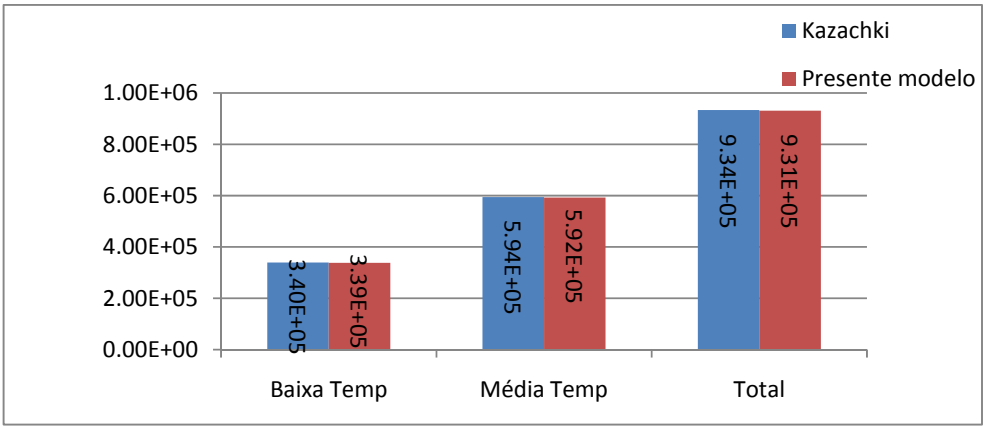

Figura 23 – Comparação entre o presente modelo e o de Kazachki – kWh/ano (2007)

Posteriormente, utilizou-se o mesmo trabalho realizado por Kazachki (2007) para um supermercado operando com um sistema com fluidos secundários, em que considera as seguintes condições de trabalho, como mostradas nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Dados gerais da simulação

Dados Gerais	(Refrigerante Primário R404a)
Locação	Atlanta, Geórgia
Área do Supermercado	4180,64 m^2
Tipo de Sistema	Com fluido Secundário

Tabela 11 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado (Kazachki, 2007)

Dados de Desenho	Baixa Temperatura (LT)	Média Temperatura (MT)
Temp. de saturação na sucção (SST)	-30,6 °C (-23 °F)	-8,3°C (17 °F)
Temp. de saturação na descarga (SDT)	43,3°C (110 °F)	43,3°C (110 °F)
Superaquecimento	5,6 K (10 °R)	5,6 K (10 °R)
Sub-resfriamento	10 °C (50 °F)	--
Diferença de temperatura no condensador	7 K (12,5 °R)	7 K (12,5 °R)
Diferença de temperatura no evaporador	4 K(7 °R)	4 K (7 °R)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Carga de Refrigeração	87,84 kW	250,67 kW
Fluido Secundário	DYNALENE HC-30	Propileno Glicol 30%

Na tabela 12 expõem-se os resultados obtidos no trabalho de Kazachki (2007) que são comparados com os resultados da presente simulação. A simulação foi realizada considerando-se as mesmas hipóteses simplificadoras e, utilizando o programa aqui desenvolvido. Determinaram-se valores muito similares aos obtidos por Kazachki (2007), mostrados na tabela 13. Novamente, é importante ressaltar que os resultados obtidos para ambas as simulações consideraram somente o consumo dos compressores, desprezando o consumo energético das vitrines, de maneira análoga ao caso anterior.

Tabela 12 – Análise BIN do trabalho do Kazachki (2007) para fluido secundário

Temperatura	**Temperatura**	**Sistema BT**	**Sistema MT**	**Total do sistema**	**Freqüência**	**Sistema LT**	**Sistema MT**	**Total Sistema**
Ambiental	**Condensação**	**Potência**	**Potência**	**Potencia**	**Horária**	**Energia BIN**	**Energia BIN**	**Energia BIN**
°C (°F)	***°C (°F)***	***kW***	***kW***	***kW***	***h***	***kWh***	***kWh***	***kWh***
38(100)	43(110)	47,85	133,10	180,95	9	4,31E+02	1,20E+03	1,63E+03
35(95)	40(105)	46,85	121,80	168,65	56	2,62E+03	6,82E+03	9,44E+03
32(90)	37(100)	45,64	110,00	155,64	196	8,95E+03	2,16E+04	3,05E+04
29(85)	34(95)	44,22	101,10	145,32	758	3,35E+04	7,66E+04	1,10E+05
26,7(80)	32(90)	42,84	91,60	134,44	768	3,29E+04	7,03E+04	1,03E+05
24(75)	29(85)	41,51	84,50	126,01	1314	5,45E+04	1,11E+05	1,66E+05
21(70)	26,7(80)	40,50	76,90	117,40	885	3,58E+04	6,81E+04	1,04E+05
18(65)	24(75)	39,24	70,00	109,24	1027	4,03E+04	7,19E+04	1,12E+05
15,6(60)	21(70)	38,04	64,10	102,14	790	3,01E+04	5,06E+04	8,07E+04
13(55)	18(65)	36,86	58,20	95,06	673	2,48E+04	3,92E+04	6,40E+04
10(50)	15,6(60)	35,70	52,80	88,50	641	2,29E+04	3,38E+04	5,67E+04
7(45)	13(55)	34,29	47,80	82,09	436	1,50E+04	2,08E+04	3,58E+04
4(40)	10(50)	33,21	43,30	76,51	560	1,86E+04	2,42E+04	4,28E+04
2(35)	10(50)	31,06	43,30	74,36	323	1,00E+04	1,40E+04	2,40E+04
-1(30)	10(50)	29,05	43,30	72,35	181	5,26E+03	7,84E+03	1,31E+04
-4(25)	10(50)	29,05	43,30	72,35	72	2,09E+03	3,12E+03	5,21E+03
-7(20)	10(50)	29,05	43,30	72,35	64	1,86E+03	2,77E+03	4,630,40
-9(15)	10(50)	29,05	43,30	72,35	7	2,03E+02	3,03E+02	5,06E+02
-12(10)	10(50)	29,05	43,30	72,35	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
-15(5)	10(50)	29,05	43,30	72,35	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo Anual em kWh					8760	3,40E+05	6,24E+05	9,64E+05

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Comparando as condições especificadas nas tabelas 12 e 13 observou-se algumas diferenças nos valores, mesmo que ainda mantêm a mesma ordem de grandeza. Os resultados consolidados podem ser observados na tabela 13. Para os resultados de média temperatura encontra-se uma diferença algo representativa. Porém, para baixa temperatura, os valores se aproximam bastante. Na figura 24 nota-se a diferença entre ambas as opções.

Tabela 13 – Análise BIN do trabalho do presente modelo para fluido secundário

Temperatura	**Temperatura**	**Sistema BT**	**Sistema MT**	**Total do sistema**	**Freqüência**	**Sistema LT**	**Sistema MT**	**Total Sistema**
Ambiental	**Condensação**	**Potência**	**Potência**	**Potência**	**Horária**	**Energia BIN**	**Energia BIN**	**Energia BIN**
°C (°F)	***°C (°F)***	***kW***	***kW***	***kW***	***h***	***kWh***	***kWh***	***kWh***
38(100)	43(110)	48,91	119,61	168,52	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
35(95)	40(105)	47,50	111,45	158,95	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
32(90)	37(100)	46,07	103,64	149,71	16	7,37E+02	1,66E+03	2,40E+03
29(85)	34(95)	44,61	96,15	140,75	172	7,67E+03	1,65E+04	2,42E+04
26,7(80)	32(90)	43,12	88,94	132,06	532	2,29E+04	4,73E+04	7,03E+04
24(75)	29(85)	41,60	82,00	123,60	714	2,97E+04	5,85E+04	8,83E+04
21(70)	26,7(80)	40,06	75,30	115,35	825	3,30E+04	6,21E+04	9,52E+04
18(65)	24(75)	36,24	60,06	96,30	1318	4,78E+04	7,92E+04	1,27E+05
15,6(60)	21(70)	36,24	60,06	96,30	1108	4,02E+04	6,65E+04	1,07E+05
13(55)	18(65)	36,24	60,06	96,30	793	2,87E+04	4,76E+04	7,64E+04
10(50)	15,6(60)	36,24	60,06	96,30	601	2,18E+04	3,61E+04	5,79E+04
7(45)	13(55)	36,24	60,06	96,30	641	2,32E+04	3,85E+04	6,17E+04
4(40)	10(50)	36,24	60,06	96,30	732	2,65E+04	4,40E+04	7,05E+04
2(35)	10(50)	36,24	60,06	96,30	454	1,65E+04	2,73E+04	4,37E+04
-1(30)	10(50)	36,24	60,06	96,30	338	1,22E+04	2,03E+04	3,25E+04
-4(25)	10(50)	36,24	60,06	96,30	276	1,00E+04	1,66E+04	2,66E+04
-7(20)	10(50)	36,24	60,06	96,30	137	4,96E+03	8,23E+03	1,32E+04
-9(15)	10(50)	36,24	60,06	96,30	82	2,97E+03	4,92E+03	7,90E+03
-12(10)	10(50)	36,24	60,06	96,30	21	7,61E+02	1,26E+03	2,02E+03
-15(5)	10(50)	36,24	60,06	96,30	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo Anual em kWh					8760	3,30E+05	5,77E+05	9,06E+05

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

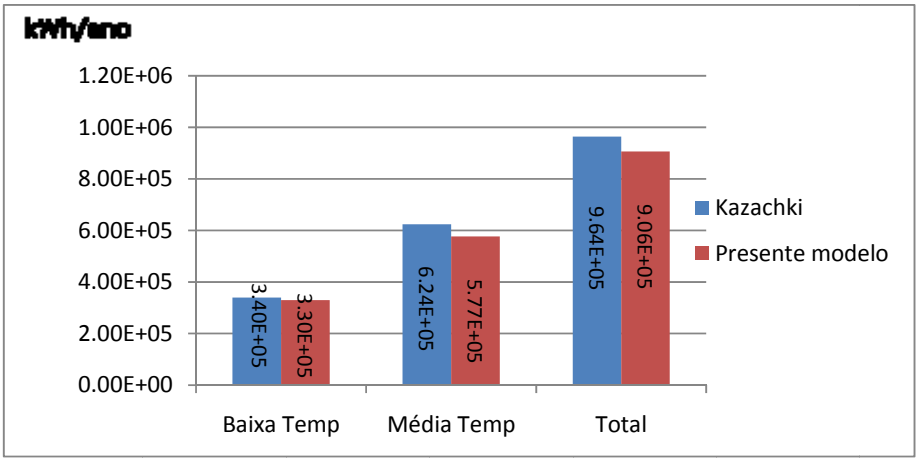

Figura 24 – Figura comparativa entre ambas as opções – kWh/ano

4.2.2. Comparação como o trabalho experimental de Sawalha (2008) - Simulação do COP de sistema cascata operando com amônia e CO_2

No trabalho de Sawalha (2008) construiu-se uma bancada de testes experimental para determinar alguns parâmetros do sistema cascata operando com amônia no lado de alta temperatura e com CO_2 do lado de baixa temperatura. Neste trabalho (Sawalha, 2008) foi levantado experimentalmente o COP tanto para o sistema de alta temperatura quanto para o sistema de baixa temperatura, além do COP global do sistema, isto é, o COP determinado para o supermercado todo, considerando alta e baixa temperaturas.

Nesta validação, executou-se é o programa aqui desenvolvido utilizando os mesmos parâmetros utilizados nas condições de laboratório de Sawalha (2008) e verifica-se se os valores se encontram na mesma ordem de grandeza.

Os parâmetros utilizados na comparação podem ser vistos na tabela 14, a seguir, para dar início à simulação e determinar os valores do COP.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Tabela 14 - Parâmetros básicos de funcionamento do sistema cascata

	Baixa Temperatura	Alta Temperatura
Temperatura de evaporação	-34 °C	-11 °C
Temperatura de condensação	---	33 °C
Carga Térmica	5,4 kW	11,7 kW

Além destes parâmetros, no trabalho de Sawalha (2008) considerou-se uma diferença de temperatura de 4 °C no condensador cascata ou trocador intermediário. A temperatura de condensação foi mantida constante em 33 °C, ao longo do experimento.

No texto do Sawalha (2008), não é detalhada a metodologia para a seleção da pressão nem da temperatura intermediárias, motivo pelo qual, no presente trabalho, considerou-se a correlação de temperatura intermediaria ótima para o trocador intermediário, descrita na equação (2.21).

Executou-se o programa aqui desenvolvido com estas mesmas condições, e obtiveram-se os seguintes resultados (ver tabelas 15 e 16):

Tabela 15 - Resultados globais da simulação

		Baixa temperatura	Alta temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-34	-11	
2.	Refrigerantes	CO_2	Amônia	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	5,4	11,7	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	3,08E+05	3,22E+04	3,40E+05
	(a) Compressores	1,07E+03	3,22E+04	3,33E+04
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	0,00E+00	3,07E+05
5.	TEWI (kg CO_2)	3,32E+06		
6.	LCCP(kg CO_2)	3,01E+06	3,15E+05	3,32E+06
	Efeito direto	3,16E+03	7,64E+02	3,93E+03
	Efeito indireto	3,00E+06	3,14E+05	3,32E+06

Tabela 16 – Resultados do COP do presente modelo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Temperatura de Bulbo seco °C(°F)	Temperatura de condensação °C(°F)	Baixa temperatura			Temperatura de condensação °C(°F)	Alta temperatura		
		COP	Potência do compressor (kW)	Energia do compressor (kWh)		COP	Potência do compressor (kW)	Energia do compressor (kWh)
29,4(85)	35(95)	4,829	0,149	25,790	35(95)	2,541	4,979	856,446
32,2(90)	37,8(100)	4,609	0,156	2,504	37,8(100)	2,453	5,333	85,330
35(95)	40,6(105)	4,408	0,162	0,000	40,6(105)	2,370	5,703	0,000
37,8(100)	43,3(110)	4,221	0,169	0,000	43,3(110)	2,292	6,091	0,000

Tabela 17 – Tabela comparativa entre os resultados de Sawala (2008) e o presente modelo

Parâmetro	Sawalha (2008)	Presente modelo	Erro(%)	COP Carnot
COP para baixa temperatura	4,5	4,61	3,25%	8,15
COP para alta temperatura	3,3	2,45	25%	5,95
COP global	2,2	2,7	22,7%	3,57

Para o sistema de baixa temperatura obtiveram-se valores de COP muito próximos, tabela 17. Já, para o sistema de alta temperatura, obteve-se uma diferença de 25%, pelo fato de ter sido utilizada uma temperatura ótima para o trocador intermediário. Eventualmente, no trabalho de Sawalha (2008), operou-se outra condição de temperatura, não especificada. Em adição, Sawalha (2008) testou, em bancada experimental, com uma temperatura constante de condensação de 33 °C (condição ideal), ao passo que, no presente modelo, as condições de temperatura de condensação mudam ao longo do ano, função da mudança da temperatura ambiente. Em conseqüência, observou-se uma divergência também nos valores do COP global.

4.2.3. Comparação com trabalho teórico da Arthur D. Little (2002) - Simulação do consumo energético global e do LCCP de um supermercado

A empresa Arthur D. Little (2002) realizou um estudo geral para diferentes campos de aplicação da refrigeração e de acondicionamento de ar. A parte referente ao presente estudo é a que apresenta resultados para o consumo energético em supermercados operando com expansão direta e com fluido

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

secundário. Nesse cálculo foi levado em conta somente o consumo dos compressores, não se considerando o consumo elétrico das cargas relacionadas às vitrines, ou seja, iluminação, ventiladores do evaporador e as resistências elétricas que cumprem diversas funções no processo de armazenamento de alimentos.

Nas tabelas 18 e 19 mostram-se as condições de simulação utilizadas pela empresa Arthur D. Little (2002) as quais, foram reproduzidas com o programa aqui desenvolvido para expansão direta.

Tabela 18 - Dados gerais da simulação (Arthur D. Little, 2002)

Dados Gerais	(Refrigerante R404a)
Locação	Não especificada
Área do Supermercado	5574,18 m^2
Tipo de Sistema	Expansão Direta

Tabela 19 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado (Arthur D. Little, 2002)

Dados de Projeto	Baixa Temperatura (LT)	Média Temperatura (MT)
Temp. de saturação na sucção (SST)	-28,9 °C (-20 °F)	-6,7 °C (20 °F)
Temp. de saturação na descarga (SDT)	43 °C (110 °F)	43 °C (110 °F)
Grau de Superaquecimento	36 K (65 °R)	13,9 K (25 °R)
Grau de Sub-resfriamento Mecânico	10 °C (50 °F)	-
Carga térmica de Refrigeração	96,64 kW	336.73 kW

Segundo o trabalho da Arthur D. Little (2002), o consumo energético de um supermercado com as condições mostradas acima oscilam na ordem de magnitude de 1,2 milhões de kWh/ano para a expansão direta e de 1,4 milhões de kWh/ano para sistemas com fluido secundário. No trabalho da Arthur D. Little (2002), não se especifica o tipo de fluido secundário utilizado, portanto é utilizado o mesmo fluido secundário do trabalho de Kazachki (2007). Para proceder à

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

simulação do sistema operando com fluido secundário, utilizaram-se os mesmos dados da simulação feita no item anterior e mostrados nas tabelas 10 e 11. No entanto, considerou-se para o sistema de fluido secundário, um acréscimo no consumo energético pela adição das bombas.

No que diz respeito ao indicador LCCP, o trabalho da empresa Arthur D. Little (2002) obteve um valor de 24 mil toneladas de CO_2 equivalentes.

A seguir, na tabela 20, comparam-se os resultados obtidos com o presente modelo com os números acima divulgados.

Tabela 20 – Consumo Energético anual, TEWI e o LCCP, previstos pelo presente modelo (expansão direta)

	Baixa Temperatura	Média Temperatura	Total
1. Temperatura de Desenho °C (°F)	-28,9 (-20)	-6,7 (20)	
2. Carga de Refrigeração Total (kW)	96,63	336,73	433,36
3. Consumo de Energia (MWh/ano)			
(a) Compressores	$0,37x10^3$	$0,8\ x10^3$	$1,17\ x10^3$
(b) Outros (degelo, condensador aquecedores, etc.)	$0,31\ x10^3$	$0,55\ x10^3$	$0,86\ x10^3$
(c) Total	$0,68\ x10^3$	$1,34\ x10^3$	$2,02\ x10^3$
4. TEWI (toneladas CO2)	$25,4\ x10^3$		
	Efeito Direito	Efeito Indireto	Total LCCP
5. LCCP (toneladas CO2)	$5,8\ x10^3$	$19,7\ x10^3$	$25,5\ x10^3$

Na análise dos resultados da tabela 20 é possível determinar que o consumo energético previsto pelo presente modelo para os compressores ficou na mesma ordem de grandeza dos valores previstos por Arthur D. Little (2002). O presente modelo, além de calcular o consumo para o sistema de refrigeração, calcula também o consumo dos outros sistemas necessários para o funcionamento do sistema de refrigeração. Observa-se que os mesmos elevam o valor para 2 milhões de kWh/ano o consumo global.

Em relação ao LCCP, o trabalho de Arthur D. Little (2002) obtém valores de $24x10^3$ toneladas de CO_2 equivalentes anuais, enquanto que o presente modelo sugere o valor de $25,5x10^3$ toneladas de CO_2 equivalentes, o que situa ambos os resultados na mesma ordem de grandeza.

No caso do sistema operando com fluido secundário, a empresa Arthur D. Little (2002) utiliza os mesmos parâmetros da expansão direta, mas considera

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

que o sistema é 10% menos eficiente devido à utilização das bombas de recirculação obtendo, com isso, um valor aproximado de 1,4 milhões de kWh/ano. Igualmente, é obtido o valor de $14x10^3$ toneladas de CO_2 equivalentes para o valor do LCCP do sistema de fluido secundário. Na tabela 21 abaixo são mostrados os valores obtidos com o programa desenvolvido no presente trabalho, executado com os mesmos parâmetros.

Tabela 21 - Consumo Energético anual, TEWI e o LCCP, previstos para o presente modelo (fluido secundario)

	Baixa temperatura	Média temperatura	Total
1. Temperatura de Desenho °C (°F)	-28,9 (-20)	-6,7 (20)	
2. Carga de Refrigeração Total (kW)	96,63	336,73	433,36
3. Consumo de Energia (MWh/ano)	0,67 $x10^3$	1,4 $x10^3$	2,07 $x10^3$
(a) compressores	0,34 $x10^3$	0,8 $x10^3$	1,14 $x10^3$
(b) Bombas	0,02 $x10^3$	0,05 $x10^3$	0,07 $x10^3$
(c) Otros (degelo, condensador, aquecedores, etc.)	0,31 $x10^3$	0,55 $x10^3$	0,86 $x10^3$
4. TEWI (toneladas CO2)	20,2 $x10^3$		
	Efeito Direito	Efeito Indireto	Total LCCP
5.LCCP (toneladas CO2)	0,3 $x10^3$	19,9 $x10^3$	20,2 $x10^3$

Tabela 22 - Tabela comparativa entre os resultados de Arthur D. Little (2002) e o presente modelo

Parâmetros	Arthur D. Little (2002)	Presente modelo	Erro (%)
Consumo energético anual para expansão direta (MWh/ano)	$1,2x10^3$	$1,17x10^3$	2,5
Consumo energético anual para fluido secundário (MWh/ano)	1,4 $x10^3$	$1,2x10^3$	14
LCCP para expansão direta (toneladas CO2)	24 $x10^3$	$25,5x10^3$	6,3
LCCP para fluido secundário (toneladas CO2)	14 $x10^3$	$20,2x10^3$	31

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA

Da tabela comparativa 22, conclue-se que estão na mesma ordem de grandeza. Cumpre lembrar que Arthur D. Little (2002) não especifica sob quais condições de temperatura de evaporação, nem de condensação, foram realizados os cálculos do consumo energetico. No entanto, para o LCCP, o programa calculou valores que se encontram dentro da mesma ordem de grandeza. Esta diferença poderia estar relacionada ao fato que o trabalho de Arthur D. Little (2202) utiliza a área do supermercado para estimar a massa do refrigerante. Por outro lado, o programa desenvolvido no presente trabalho determina a massa do refrigerante mediante uma análise um pouco mais detalhada em cada um dos elementos do sistema de refrigeração (linhas, evaporador, condensador e tanque reservatório).

4.3. Conclusão

Pode-se afirmar que não há um modelo exato, muito menos que tenha uma margem de erro pequena. É possível, entretanto, garantir que, no presente modelo termodinâmico, os resultados encontram-se na mesma ordem de grandeza em relação aos resultados da literatura consultada. Portanto, o modelo pode ser utilizado com confiança para fazer diferentes estudos de casos, os quais serão apresentados no capítulo seguinte.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812215/CA