

"ESTUDO SOBRE O RESFRIAMENTO DO LEITE
NAS GRANJAS DOS PEQUENOS PRODUTORES"

04/79

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

"ESTUDO SOBRE O RESFRIAMENTO DO LEITE
NAS GRANJAS DOS PEQUENOS PRODUTORES"

Autora: JUDIT ZOLTÁN HALÁSZ
Orientador: Dr. LÁSZLÓ HALÁSZ

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS.

FEVEREIRO DE 1979

UNICAMP

RESUMO

Foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o problema do resfriamento do leite nas granjas com especial interesse na solução adotada pela França na década passada.

Uma experiência direta a respeito do recolhimento do leite na região de Campinas trouxe informações bastante desfavoráveis.

Foram feitos testes de laboratório de um resfriador de leite de produção nacional com bons resultados.

Foi elaborado um programa de computador para a simulação da operação de um dia de funcionamento deste equipamento.

Um segundo programa de computador foi preparado para uma transformação do equipamento, aplicando o conceito da acumulação de frio, e os efeitos da transformação são discutidos na base dos resultados de cálculo.

ABSTRACT

A literature survey of the problem of milk refrigeration in farms has been carried out, giving special emphasis to the system adopted in France during the last decade.

Data on collection of milk obtained in the neighbourhood of Campinas showed that the procedures employed were on the whole unsatisfactory.

Laboratory tests performed when employing a Brazilian made milk cooler have produced good results.

A computer program was developed to simulate a daily operation of the above equipment.

Another computer program was prepared for a modification of this equipment when applying the concept of storage of cold.

The effects of this modification are discussed on the basis of the results of the calculations.

INDICE

	Pág
<u>CAPÍTULO I</u>	
1) INTRODUÇÃO	1
<u>CAPÍTULO II</u>	
2) ESTUDO DE LITERATURA	3
2.1. Sobre o leite	3
2.2. Métodos de resfriamento na granja	7
2.3. Comparação entre os métodos de resfriamento de leite	11
2.4. Transmissão de calor no resfriador com expansão direta	16
2.5. Acumulação de frio	19
2.6. Transferência de calor no lado da água no sistema de acumulação	21
<u>CAPÍTULO III</u>	
3) MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. Estudo de recolhimento	23
3.2. O equipamento	24
3.3. O experimento	27
3.4. Modelo matemático da expansão direta	30
3.5. Acumulação	40
<u>CAPÍTULO IV</u>	
4) RESULTADOS	47
4.1. Do experimento	47
4.2. Da simulação (expansão direta)	49
4.3. Da acumulação	50
<u>CAPÍTULO V</u>	
5) CONCLUSÕES	52

<u>SÍMBOLOS</u>	54
<u>APÊNDICES</u>	
Apêndice 1 - 9 cálculos	57
Apêndice 10 - 11 fluxogramas	73
Apêndice 12 - 13 programas do computador	79
<u>TABELAS</u> A.1 - A.4	86
<u>FIGURAS</u> A.1 - A.12	92
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	104

CAPÍTULO I

I INTRODUÇÃO

A produção e o processamento do leite são fatores significativos não somente do ponto de vista da agricultura mas de toda a vida econômica de um país. Por exemplo na Alemanha Ocidental em 1951/52, o leite apresentou 25,9% do valor da produção agrícola, igual ao valor das indústrias de roupas (1).

O leite é uma substância alimentícia básica que contém, em composição adequada, todos os materiais para assegurar energia, construção do organismo e capacidade de utilização destes materiais.

Ao mesmo tempo o leite é um material muito delicado que se deteriora rapidamente sob as condições do ambiente. Por isso em favor da saúde de uma comunidade, deve haver uma organização da produção e da distribuição do leite. Uma das maiores tarefas desta organização é o resfriamento do produto e a sua manutenção à baixa temperatura até o consumo.

A Lei proíbe, no Brasil, a comercialização direta do leite (2). Os produtores devem entregá-los aos laticínios que, após tratamento adequado, comercializam-no em parte como bebida, em parte produzindo diferentes derivados, como manteiga, queijo, yogurte, creme de leite, leite condensado, leite em pó.

Para os maiores produtores, mais ou menos acima de uma produção diária de 1000 litros, isto é, com aproximadamente 100 vacas, a economia de produção necessita de equipamentos de ordenha, e resfriamento imediato após esta ordenha.

Em alguns minutos o leite vai do corpo do animal ao tanque, já sendo resfriado, através de um sistema fechado, em condições higiênicas.

O transporte ao laticínio ocorre 1 ou 2 vezes por dia.

Este é o leite de qualidade B.

Para o pequeno produtor as condições são bem diferentes. A ordenha ocorre à mão em um balde, de onde o leite será despejado no latão.

O leite é facilmente infectado: através da mão do ordenhador, dos insetos do estábulo, ou dos utensílios usados.

Em muitos casos não se tem equipamento de resfriamento, os latões às vezes colocados ao sol, esperam algumas horas, para o transporte ao laticínio.

O número de germes no leite é bastante alto e não pode ser reduzido pelo resfriamento; apenas a qualidade bacteriológica pode ser aproximadamente conservada.

Este é o leite de qualidade C.

Além do treinamento do pessoal para trabalhar higienicamente, o que não custa quase nada, a maior possibilidade para melhorar a situação do pequeno produtor é o resfriamento imediato após a ordenha.

Foram desenvolvidos diferentes resfriadores de leite para este objetivo.

Este trabalho pretende dar uma visão geral com base na literatura, sobre as possibilidades de resfriamento econômico do leite para o pequeno produtor, além disso estudou-se experimentalmente um resfriador, considerado como um dos melhores equipamentos e finalmente verificou-se teoricamente uma modificação desse equipamento.

CAPÍTULO II

II. ESTUDO DE LITERATURA

2.1. Sobre o leite

2.1.1. Propriedades

Quanto a sua composição o leite contém 86,5 ... 89,5% de água (1).

A composição do material seco é:

gordura	27,9%
caseína	24,4%
proteína	3,7%
açúcar	38,3%
sal	5,7%

O valor nutritivo do leite é 670 kcal/kg (1).

Para comparação com outros alimentos tem-se:

pão	2400 kcal/kg
arroz	3600 "
feijão	3490 "
carne magra	1300 "

O valor nutritivo dos derivados de leite (1) é muito alto:

manteiga	7400 kcal/kg
queijo (emental)	4100 "

As propriedades térmicas mais importantes do leite integral são:

peso específico	a 15°C	1,028 ... 1,035 kg /dm ³
calor	"	0,933 kcal/kg °C

A viscosidade do leite é função da temperatura e de sua qualidade. O leite integral tem maior viscosidade que o padronizado.

A viscosidade dinâmica (absoluta) é (1):

temperatura (°C)	0	10	20	30	40
viscosidade (cP)					
do leite integral	3,5	2,7	2	1,5	1,2
do leite padronizado	3	2,2	1,7	1,3	1

Para comparação:

água	1,79	1,31	1,0	0,80	0,56
------	------	------	-----	------	------

Os valores da água foram calculados com base na seguinte equação (3):

$$\frac{1}{\mu} = 2,1482 \left((t-8,435) + \sqrt{8078,4 + (t-8,435)^2} \right) - 120 \quad (P) \quad (1)$$

Condutividade térmica do leite (4) é:

$$k = 0,473 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$$

Este valor refere-se ao leite integral (gordura 3,6%) à 1,5°C.

Para comparação:

água (5)	0°C:	$k_A = 0,491$	kcal/m °C h
	30°C:	$k_A = 0,530$	"

2.1.2. Qualidade do leite

Para produção do leite B deve-se observar:

Art.537

§ 1º O leite pasteurizado para ser exposto ao consumo como integral deve apresentar:

1. caracteres organolépticos normais do leite cru;
2. teor de gordura original, isto é, sem acréscimo e sem diminuição;
3. acidez não inferior a 15°
4. extrato seco desengordurado não inferior a 8,5%
5. extrato seco não inferior a 12,2%
6. densidade a 15°C entre 1028 e 1033
7. ponto crioscópico -0,55°C
8. índice refratométrico no soro cúprico a 20°C não inferior a 37°C Zeiss.

Art.540

§ 2º O número de germes por mililitro não deve ser superior à 500.000 antes e 40.000 depois da pasteurização, para o tipo "B".

Art.510

§ 4º No posto de refrigeração, ou no entreposto usina será conservado à temperatura máxima de 5°C.

§ 7º Não se permite, para o leite tipo "B", a padronização, o pré-aquecimento e a congelação.

Uma publicação recente do Instituto Internacional do Frio (31) menciona o seguinte:

"Na maioria dos países de clima moderado a norma é como segue: o leite para se manter 24 horas, é resfriado a 10°C; se deve ser mantido até 48 horas, tem que ser resfriado a 4°C, dentro de 3 horas após a ordenha".

2.1.3. Estado bacteriológico do leite

No úbere da vaca encontra-se leite estéril somente em 5% dos animais (17). O leite não pode ter mais de 10.000 germes por ml no tempo da coleta, e 1.000.000 de germes no tempo de seu processamento no laticínio (17).

A propagação dos germes depende muito da temperatura. Se a temperatura é inferior a 10°C , a propagação é muito lenta, mas acima desta temperatura, aumenta exponencialmente. A Fig. 1(1) mostra este fenômeno.

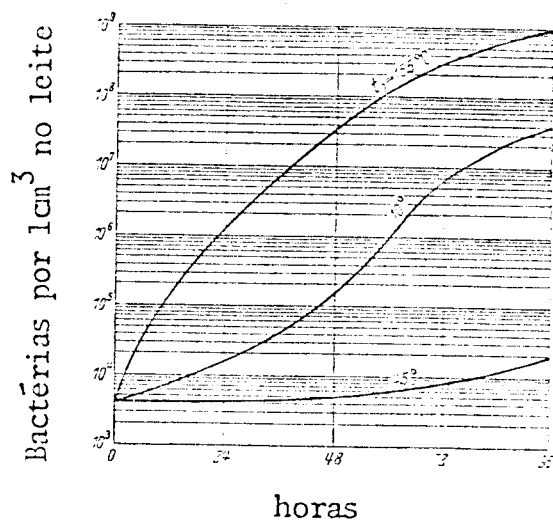


Fig. 1 - Multiplicação dos germes no leite.

Pode-se ver que a $4,5^{\circ}\text{C}$ o leite fica praticamente no seu estado original após 48 horas.

A Tabela 1 mostra a propagação dos germes em função da qualidade original do leite fresco.

Tabela 1 - Propagação dos germes no leite em função da sua qualidade original (17).

Nº de germes no leite fresco	Temperatura de estocagem °C	Após 14 h Número de germes em relação ao estado original	Após 48 h Número de germes em relação ao estado original
4.000	4,5	1	1
	10	3	30
	16	372	4700
40.000	4,5	2	3
	10	5	21
	16	113	2540
150.000	4,5	2	4
	10	8	100
	16	180	4700

Como o número de germes no leite fresco depende principalmente da limpeza da ordenha, podemos ver que a limpeza e o resfriamento imediatamente após a ordenha na granja são inseparáveis.

2.2. Métodos de resfriamento na granja

2.2.1. Resfriador de imersão

O equipamento consiste em um tanque de água isolado, sem agitador, e a unidade condensadora. O evaporador está imerso na água, resfriando-a, e os latões com o leite serão colocados no tanque (18).

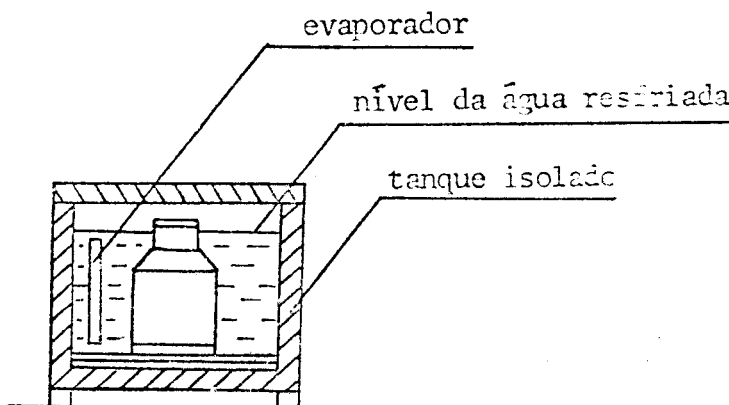


Fig. 2 - Resfriador de imersão.

Antigamente eram usados tanques onde o nível de água subia conforme o número dos latões ali colocados. Assim, depois de uma ordenha, o nível da água de resfriamento não chegava até o pescoço do latão, deixando a parte mais crítica sem resfriamento.

O creme de leite subia e como é o mais gorduroso, a propagação dos germes aí é mais rápida, especialmente sem resfriamento.

Mas hoje em dia o nível da água de resfriamento mantido constante, cobre sempre o pescoço do latão.

2.2.2. Resfriamento por aspersão

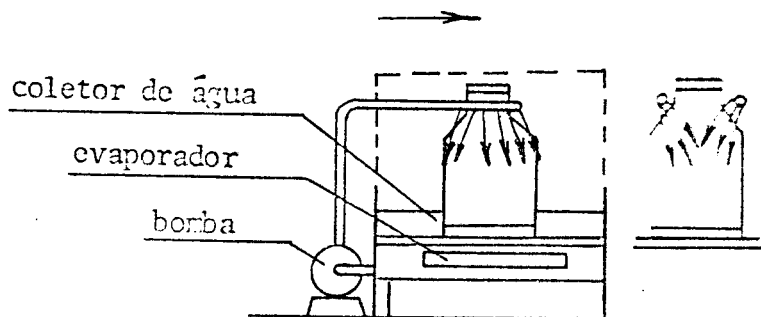


Fig. 3 - Resfriador de aspersão.

Nestes equipamentos os latões de leite são colocados em um tanque. Há um anel de tubo perfurado dobrado circularmente no pescoço de cada latão e asperge a água fria sobre a superfície da lata. No fundo do tanque encontra-se o evaporador, e uma bomba faz circular a água.

2.2.3. Resfriamento por gelo de leite

O gelo de leite será produzido em uma geladeira doméstica e depois colocado no latão contendo leite quente. (Este método serve apenas para pequenos produtores).

1.2.4. Resfriamento por gorgoleijo

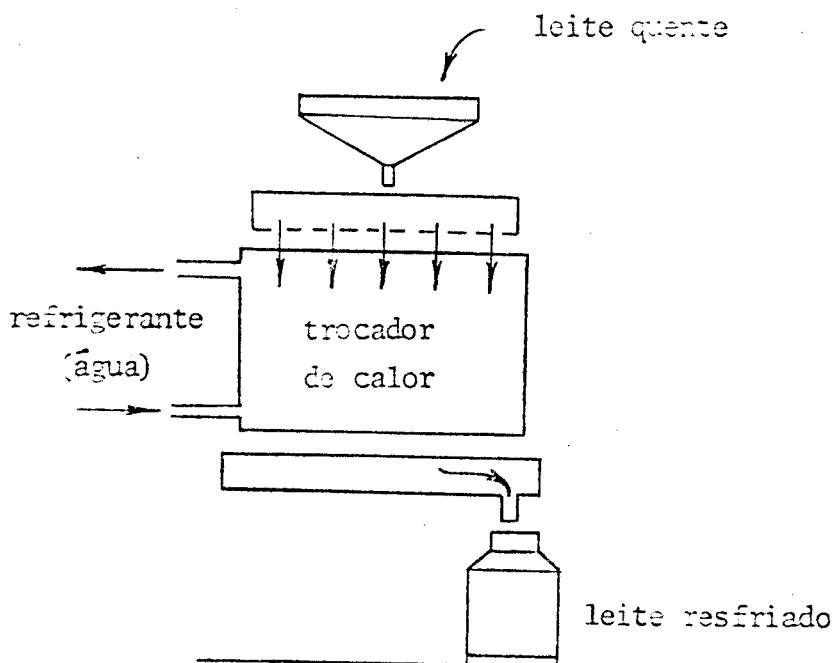


Fig. 4 - Resfriador de gorgoleijo.

Este equipamento tem um tanque na parte superior, onde o leite é vazado da lata. Do mesmo tanque o leite corre para baixo sobre a superfície fria, formada por tubos horizontais, dentro dos quais circula o fluido de resfriamento. O leite assim resfriado é recolhido em um tanque colocado em baixo, de onde será esvaziado nas latas.

Os resfriadores de maior capacidade constam de duas partes:

- o pré-resfriador a parte superior, resfriado a água,
- o resfriador de baixa temperatura a parte inferior, resfriado por evaporação direta do refrigerante.

2.1.5. Resfriamento de tanque

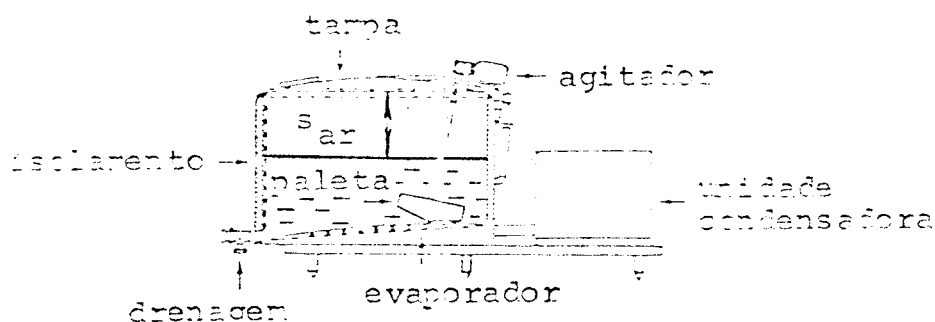


Fig. 5 - Resfriador de tanque.

Este método é o mais moderno. O leite depois da ordenha é colocado num tanque isolado, onde será resfriado o mais rapidamente possível até 4°C e ficará nesta temperatura até que o caminhão-tanque o retire. Este tanque, geralmente dimensionado para 4 ordenhas, possibilita a coleta uma vez cada dois dias. O resfriamento acontece através da parede do tanque. O evaporador (tubo espiral) tem bom contato térmico com o fundo de tanque e para melhorar a transferência de calor e a igual distribuição da temperatura do leite, pode ser usado um agitador.

2.1.6. Equipamento transportável

Após a Segunda Guerra Mundial, desenvolveu-se na Alemanha Ocidental um equipamento complexo, constando da máquina de ordenha, resfriador e tanque coletor, tudo montado em um caminhão(1). Este visitava as granjas recolhendo o leite de excelente qualidade. Provavelmente, por causa de alto custo de transporte este método não se mostrou econômico.

2.1.7. Resfriamento por imersão direta

É um novo método, desenvolvido na Europa (27) para pequena produção. O evaporador, junto com o agitador será colocado

na lata; a ligação com a unidade condensadora é flexível (Fig. 6). As unidades com equipamento frigorífico de 0,5 HP são monofásicas, as de 1 HP são trifásicas.

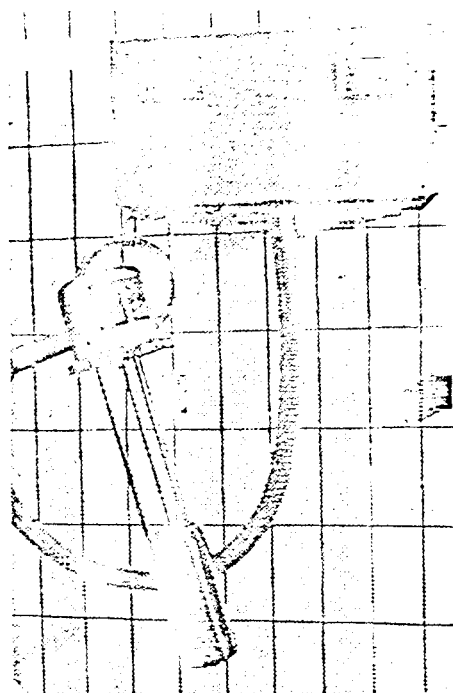


Fig. 6 - Resfriador por imersão direta.

2.3. Comparação entre os métodos de resfriamento de leite

Para uma comparação entre estes métodos podemos considerar os seguintes pontos de vista:

- o tempo de resfriamento,
- a possibilidade de contaminação,
- o consumo de energia,
- a dificuldade de tratamento,
- questões econômicas.

2.3.1. Tempo de resfriamento

Para os métodos de resfriamento, quando em latas, a temperatura média do leite, em função do tempo, pode ser aproximada-

$$t = t_R + (t_{ic} - t_R) e^{-\tau/T} \quad ^\circ\text{C} \quad (2.1)$$

onde T é a "constante de tempo" (h).

Usa-se também o "tempo de metade do resfriamento" ($T_{1/2}$); que é o tempo durante qual a diferença entre a temperatura do leite (t) e a do meio de resfriamento (t_R) fica reduzido a metade. A relação entre estes tempos é

$$T_{1/2} \cong 0,69 T \quad \text{h} \quad (2.2)$$

T ou $T_{1/2}$ foram determinados experimentalmente, com latas de 20 litros; a Tabela 2 mostra alguns resultados.

Tabela 2 - Constante de tempo (T) e tempo de metade do resfriamento ($T_{1/2}$) para resfriamento em latas.

Método de resfriamento	T (h)	$T_{1/2}$ (h)
Imersão: latas metálicas (19) (20)	1,4	1,0
(21)	0,4	0,3
recipientes plásticos (19) (20)	2,2	1,5
Aspersão: latas metálicas (19)	0,9	0,6
(20)	0,6	0,4
Gelo de leite (22)	0,25	0,17
Imersão direta (27)	0,28...0,53	0,19...0,37

Segundo os microbiologistas, $T_{1/2}$ seja pelo menos em ordem de 1 hora; assim, como mostram os resultados, recipientes de plástico não são adequados para imersão e aspensão (20).

Para o resfriamento por gelo de leite a quantidade deste é decisiva (22). 2 kg de gelo de leite não são suficientes para diminuir a temperatura abaixo de 20°C; para atingir uma temperatura menor que 10°C foram necessários 5 kg de gelo de leite. A constante de tempo pode-se calcular partindo da seguinte equação

$$T = (mc)/(h_{gl} A_g) \quad \text{h} \quad (2.3)$$

onde (mc) equivalente de água do leite mais lata
 $\text{kcal}/^{\circ}\text{C}$

h_{gl} coeficiente de transferência de calor entre
 gelo e leite $\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ h } ^{\circ}\text{C}$

A_g área de superfície (média) do gelo de leite
 m^2

Este método de resfriamento é bastante rápido, por causa de boa transferência de calor ($h_{gl} \approx 250$); além disso há outra vantagem; o resfriamento pode ser efetuado durante o transporte, e assim, não há necessidade de começar muito cedo a ordenha da manhã.

O resfriamento por gorgoleijo é muito rápido; no equipamento testado 20 l/min. de leite foram resfriados até 5°C (21). A distribuição de temperatura é muito uniforme, entretanto, no fim do resfriamento por imersão ou aspensão a temperatura no centro da lata pode ser $2-3^{\circ}\text{C}$ mais alta que na superfície (19).

O conteúdo de gordura do leite afeta também o tempo de resfriamento, sendo maior gordura, a quantidade deste tempo aumenta; sobre este efeito encontra-se uma relação em (20).

Leite em lata não isolada sofre um aumento de temperatura em condições ambientais; pode ser considerado por uma constante de tempo de $T \approx 8$ horas (23).

2.3.2. Possibilidade de contaminação (20), (21), (22), (23)

Imersão: A água do tanque polui rapidamente; é aconselhável lavar-se as latas antes de colocá-las no tanque e usar uma solução desinfetante.

Aspensão: A água de resfriamento igualmente de rápida poluição deve ser muito limpa. As impurezas podem até bloquear o escoamento.

Gelo de leite: A manipulação do gelo de leite necessita de grande limpeza, por haver grande risco de contaminação.

Gorgoleijo: A limpeza do equipamento deve ser rigorosamente observada, pois há sempre a possibilidade de infecção do leite, especialmente se fica perto do estábulo. O

Imersão direta: Encontrou-se um número de germes até $1,8 \cdot 10^6$ por dm^2 da superfície do evaporador, mas após a limpeza, a superfície tornou-se praticamente sem germes (27).

2.3.3. Consumo de energia

O consumo de energia por litro de leite pode ser expresso pela seguinte equação (20)

$$E = e + at_0/v \quad \text{Wh/l} \quad (2.4)$$

onde

e	energia necessária para o resfriamento útil	Wh/l
a	energia para compensar as perdas	W
t_0	tempo entre duas ordenhas sucessivas	h
v	volume de leite por ordenha	l

A Tabela 3 mostra alguns valores medidos.

Tabela 3 - Consumo de energia (Wh/l) para diferentes métodos de resfriamento de leite.

Método	E (Wh/l)
Imersão: sem agitação (20)	40
com agitação (20)	40...60
(24)	33,6
Aspersão (24)	42
Gelo de leite (24)	37,8
Resfriador de tanque (20):	
com água gelada	40
expansão direta	20...30
Imersão direta (27):	
em lata isolada	20,5
em lata não isolada	21,8
manutenção automática da temperatura final (4°C) durante 12 horas:	
lata isolada	4,5
lata não isolada	28,3

2.3.4. Dificuldade de tratamento

- Imersão:** A manipulação das latas é fatigante por causa da ação de levantá-las. É aconselhável lavar as latas antes de colocá-las no tanque (24).
- Aspersão:** A água deve ser muito limpa. Este método não assegura a estocagem frigorífica do leite resfriado (24).
- Gelo de leite:** Rigorosa higiene deve ser observada na manipulação do gelo de leite. O congelamento do leite modifica suas propriedades, e pode ser desfavorável para a produção de queijo (24), por exemplo.
- Gorgoleijo:** O tratamento das latas é muito cansativo. O aparelho precisa de grande limpeza (23).

2.3.5. Questões de economia

Segundo Anquez (25) só 5% do leite era resfriado imediatamente após a ordenha em 1961 na França. O custo de resfriamento foi 0,02 ... 0,03 FF/litro. O pequeno produtor (até 40 l/dia) usava o gelo de leite, até uma produção de 230 l/dia imersão e acima desta quantidade, o gorgoleijo. Para obter o seu resfriador o produtor teve duas possibilidades de financiamento: compra individual ou através do laticínio.

Leschot (21) descreve a situação de uma cooperativa. O produtor que entrega o leite em boas condições, isto é, resfriado, recebe um prêmio. Uma parte deste prêmio ele paga à cooperativa como prestação e após 42 meses terá adquirido seu próprio resfriador. Como resultado do resfriamento nas granjas o número de germes verificado em 1953, que era 1.600.000/ml foi reduzido para 330.000/ml em 1960.

Após muitos estudos a França decidiu (26), baseando-se no exemplo dos EUA, Inglaterra e países do Norte, introduzir a coleta do leite por caminhões-tanque (bulk milk collection) e a ampla aplicação dos resfriadores de tanque, com capacidade de 200 a 1000 litros.

2.4. Transmissão de calor no resfriador com expansão direta

2.4.1. Transferência de calor entre a parede do tanque cilíndrico e o líquido agitado

Encontram-se muito poucos dados na literatura sobre este assunto. Segundo (3) os resultados de Chilton et al. (6) podem ser considerados como confiáveis. Outros pesquisadores (7) acharam praticamente os mesmos resultados, se bem que as dimensões dos tanques fossem muito diferentes. A relação em forma adimensional é a mesma que a usada para convecção forçada:

$$Nu = C Re^m Pr^n (\mu / \mu_s)^{0,14} \quad (2.5)$$

As constantes são: $C = 0,36$ $m = 2/3$ $n = 1/3$

A temperatura de referência, isto é, na qual as propriedades térmicas do líquido devem ser substituídas, é a temperatura do líquido longe da superfície. O número de Reynolds calcula-se como segue

$$Re = L^2 N \rho / \mu \quad (2.6)$$

onde

L comprimento característico, aqui diâmetro do agitador

Finalmente o coeficiente de transferência de calor é determinado pela seguinte fórmula

$$h = Nu k / L \quad (2.7)$$

onde o comprimento característico (L) é o diâmetro do tanque (D_{ta}).

2.4.2. Transferência de calor durante evaporação do refrigerante R-12 em tubo horizontal

A fórmula mais usada é a de Bo Pierre (9),

$$h_i = C \frac{k}{d_i} \left(\left(\frac{G d_i}{\mu} \right)^2 \frac{I(\Delta x h_{fg})}{L_t} \right)^n \quad \text{Btu/h ft}^2 \text{ F} \quad (2.8)$$

onde

C e n	são constantes. Para o evaporador seco, que é o nosso caso: C = 0,0082	n = 0,4
k	condutividade térmica do líquido	Btu/h ft °F
μ	viscosidade dinâmica do líquido	lb/h ft
d_i	diâmetro interno do tubo	ft
I =	788,16 equivalente mecânico do calor	lb ft/Btu
$(\Delta x h_{fg})$	= q_0 efeito frigorífico	Btu/lb
L_t	comprimento do evaporador	ft
G	velocidade massica	lb/h ft ²

Esta fórmula dá o coeficiente médio de transferência de calor. O mesmo varia bastante ao longo do tubo, durante o escoamento de duas fases. Seu valor local pode ser calculado segundo Chawla (10), considerando a variação da "qualidade de escoamento"

$$\dot{x} = \dot{m}_V / \dot{m}_R \quad (2.9)$$

e propriedades do líquido e vapor.

2.4.3. Transferência de calor através de uma camada de ar

Este caso de transferência de calor que ocorre acima do nível de leite no resfriador (Fig. 5) foi recentemente estudado por Achtziger (11). O calor pode ser transferido pelos três meios: condução, convecção e radiação. Introduzindo o "coeficiente de condução equivalente" (k') podemos afirmar que o fluxo de calor por m² de superfície (\dot{q}) será

$$\dot{q} = (k'/s_{ar}) \Delta t \quad \text{kcal/hm}^2 \quad (2.10)$$

onde

s_{ar}	espessura da camada de ar	m
Δt	diferença de temperatura entre as duas superfícies que limitam a camada de ar	°C

k' é definido como

$$k' = k_{ap} + k_r \quad \text{kcal/mh } ^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

onde k_{ap} é a condutividade térmica aparente, a qual expressa, além da condução, o calor transferido por convecção também. k_{ap} é determinado pela seguinte equação

$$(q_{cond} + q_{conv}) = (k_{ap}/s_{ar}) \Delta t \quad \text{kcal/hm}^2 \quad (2.12)$$

k_{ap} , segundo os experimentos, em uma grande faixa de temperatura, é função do número de Grashof. A relação encontra-se na referência (11).

Quanto a k_r na eq. (2.11) expressa o papel da radiação, e é determinado pela seguinte fórmula

$$k_r = s_{ar} C_{12} \left(\frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{T_1 - T_2} \right) \quad (2.13)$$

onde

C_{12} fator de emissividade mútua entre as duas superfícies que limitam a camada de ar $\text{kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$

Para calcular C_{12} entre superfícies paralelas serve a seguinte relação (13)

$$C_{12} = C_s (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)^{-1} \quad (2.14)$$

2.4.4. A temperatura média da parede do tanque

O tubo do evaporador forma uma espiral, com bom contato térmico com o fundo do tanque de leite, como mostra a Fig. (A.3.1). Considerando tubos retos, em vez dos espirais, para cada tubo pertence uma "aleta" de largura de 2 mm. A distribuição de temperatura de aleta segue uma função hiperbólica e a temperatura média determina-se como segue (12, 23), por meio da eficiência de aleta

$$\eta = (t - t_{al}) / (t - t_t) = (1 - X) / (\tanh X) =$$

$$= \frac{1}{X} \cdot \frac{e^X - e^{-X}}{e^X + e^{-X}} \quad (2.15)$$

onde o parâmetro X é

$$X = (h/k \delta)^{0,5} m_{al} \quad (2.16)$$

desprezando o pouco calor transferido no lado do isolamento.

2.5. Acumulação de frio (29)

Para resfriamento do leite a utilização do equipamento frigorífico é muito baixa. Trabalha somente duas vezes (para as duas ordenhas), num total de 4 a 6 horas por dia.

Com acumulação de frio usa-se um meio intermediário (água) entre o refrigerante e o leite. O equipamento frigorífico trabalha, pode-se dizer, continuamente, e entre duas ordenhas forma-se gelo na superfície do evaporador. Durante o resfriamento do leite, por causa da grande carga térmica, a temperatura da água aumenta um pouco, o gelo descongela, ajudando assim o equipamento frigorífico, que tem uma capacidade frigorífica consideravelmente menor, neste caso, do que no caso da expansão direta.

A formação de gelo no evaporador é determinada por dois fluxos de calor:

1) o calor transferido da água à superfície do gelo por 1 m de comprimento de tubo é

$$\dot{q}_1 = (D \pi) h_{Ag} (t_A - t_{sg}) \quad \text{kcal/hm} \quad (2.17)$$

2) o calor retirado da superfície do gelo pelo equipamento frigorífico é

$$\dot{q}_2 = U_1^* (t_{sg} - t_o) \quad \text{kcal/hm} \quad (2.18)$$

Durante o congelamento, quando $\dot{q}_2 > \dot{q}_1$, o diâmetro do gelo aumenta por dD durante o tempo $d\tau$, e o calor retirado é

$$d\dot{Q} = (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) d\tau = D\pi (dD/2) q_g \rho_g \quad \text{kcal} \quad (2.19)$$

Das equações (2.17), (2.18) e (2.19) a equação diferencial descrevendo a formação de gelo ($dD/d\tau$) pode ser derivada.

Para descongelamento, na eq. (2.19) \dot{q}_1 e \dot{q}_2 trocam de lugar.

O coeficiente de transmissão de calor entre a superfície do gelo e o refrigerante é (5, 9, 13)

$$\frac{1}{U_i^*} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2k_g} \ln(D/d_e) + \frac{1}{2k_t} \ln(d_e/d_i) + \frac{1}{h_i d_i} \right) \quad (2.20)$$

O diâmetro do gelo em função do tempo depende assim dos seguintes parâmetros: d_i , d_e , h_i , h_{Ag} , t_A , t_o , entre os quais só d_i e d_e são constantes.

A temperatura da água (t_A) é sempre determinada:

- 1) pela carga térmica (\dot{Q}), isto é, o calor transferido do leite à água;
- 2) pelo calor transmitido à água do ambiente (\dot{Q}_{tr});
1) e 2) aumentam t_A ;
- 3) pela transferência de calor da água ao gelo, a qual atua em direção contrária.

Durante o tempo elementar ($d\tau$) a mudança na t_A é dt_A e a relação será

$$m_A c_A dt_A = (\dot{Q} - \dot{q}_1 L_t) d\tau \quad \text{kcal} \quad (2.21)$$

de onde a relação entre t_A e o tempo (τ) pode ser determinada.

Quanto à variação da temperatura de evaporação (t_o) esta depende de um lado do comportamento do compressor (respectivamente unidade condensadora), que pode ser conhecido por suas características, fornecidas pelo fabricante: $\dot{Q} = f(t)$

Por outro lado, t_o é afetada pelas condições de transferência de calor no evaporador; deve existir a seguinte relação:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{oe} = \dot{q}_2 L_t \quad \text{kcal/h} \quad (2.22)$$

As outras variáveis (D, h_i) já foram tratadas anteriormente, o caso de h_{Ag} será estudado no item 2.6.

2.6. Transferência de calor no lado da água no sistema de acumulação

Como a água não é agitada, temos convecção natural e vale a equação adimensional (12, 28)

$$Nu = C (Gr Pr)^n \quad (2.23)$$

Aqui o número de Grashof calcula-se da seguinte equação

$$Gr = (L^3 \rho^2 g \beta \Delta t) / \mu^2 \quad (2.24)$$

e o número de Prandtl é

$$Pr = (c \mu) / k \quad (2.25)$$

Para o cálculo de Gr e Pr a temperatura de referência, isto é, pela qual as propriedades térmicas da água (ρ, β, k, μ, c), devem ser substituídas, é determinada como segue

$$t_{fr} = (t_{PA} + t_A) / 2 \quad ^\circ C \quad (2.26)$$

O coeficiente de expansão volumétrico (β) é definido da seguinte maneira (12, 28)

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_p \cong - \frac{1}{\rho} (\rho_s - \rho) / (t_{PA} - t_{fr}) \quad 1/K \quad (2.27)$$

(β é sempre um valor positivo).

na eq. (2.24) é a diferença de temperatura entre a parede e a água

$$\Delta t = t_{PA} - t_A \quad ^\circ\text{C} \quad (2.28)$$

Finalmente, o coeficiente de transferência de calor h_{Ag} calcula-se do Nu com eq. (2.7), o comprimento característico (L) é o mesmo como na eq. (2.24).

As constantes (C e n) na eq. (2.23) foram determinadas experimentalmente para os diferentes casos que são interessantes - neste estudo:

Para parede vertical (28):

$$\begin{array}{ll} 10^4 < (Gr Pr) < 3,5 \cdot 10^7 & C = 0,55 \quad n = 1/4 \\ 3,5 \cdot 10^7 < (Gr Pr) < 10^{12} & C = 0,13 \quad n = 1/3 \end{array}$$

O comprimento característico (L) é a altura da parede vertical.

Para parede horizontal, aquecida por cima (28):

$$C = 0,27 \quad n = 1/4$$

O comprimento característico é a dimensão horizontal da parede, no caso do tanque o seu diâmetro ($L = D_{ta}$).

Para tubo horizontal (28):

$$C = 0,53 \quad n = 1/4$$

O comprimento característico é o diâmetro do tubo ($L = d_e$).

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Estudo do recolhimento

No dia 9 de dezembro de 1977 efetuou-se uma viagem, acompanhando o recolhimento do leite.

A "Leco" tem contrato com donos de caminhões, que transportam o leite ao laticínio nos latões de 50 litros.

Os pequenos produtores entregam leite uma vez, os maiores duas vezes por dia.

Este recolhimento foi feito na região de Viracopos. Entre 5:30 e 9:30 horas o caminhão percorreu 140 km, e recolheu 1971 litros de leite C e 2930 litros de leite B. Esta quantidade foi produzida por 24 produtores e recolhida em 19 postos.

Seis produtores possuem congeladores, onde o leite da ordenha da noite será colocado em latas de óleo e margarina, sem qualquer tampa, assim podendo adquirir o odor dos outros alimentos do congelador. A quantidade de leite destes produtores raras vezes chega a 100 litros.

Três produtores tinham resfriador de imersão. Estes equipamentos servem para resfriar 400 litros de leite, mas a temperatura do leite resfriado chega apenas até 10 - 15°C, o que não é adequado.

Um dos produtores possui resfriador de tanque agitado, tipo Wesftalia, com capacidade de 400 litros. Misturando o leite da ordenha de manhã com o da ordenha de noite anterior, a temperatura fica entre 15 e 20°C no período da coleta.

O maior produtor tem um resfriador de tanque com agitador, tipo Alfa-Laval, com capacidade de 5000 litros. Ele entrega o leite duas vezes por dia.

Naquela manhã havia 2000 litros, resfriados à temperatura de 15°C.

Os demais produtores estão entregando o leite da ordenha da manhã sem qualquer resfriamento, assim, não podendo aproveitar a quantidade de leite da ordenha da noite anterior.

Não é possível generalizar as experiências desta única viagem, porém daí se poderá concluir alguma coisa a respeito da si tuação.

Do leite recolhido:

31,6 % não recebeu nenhum resfriamento no produtor,

51,9 % teve uma temperatura entre 15 e 20°C,

16,5 % teve uma temperatura entre 10 e 15°C.

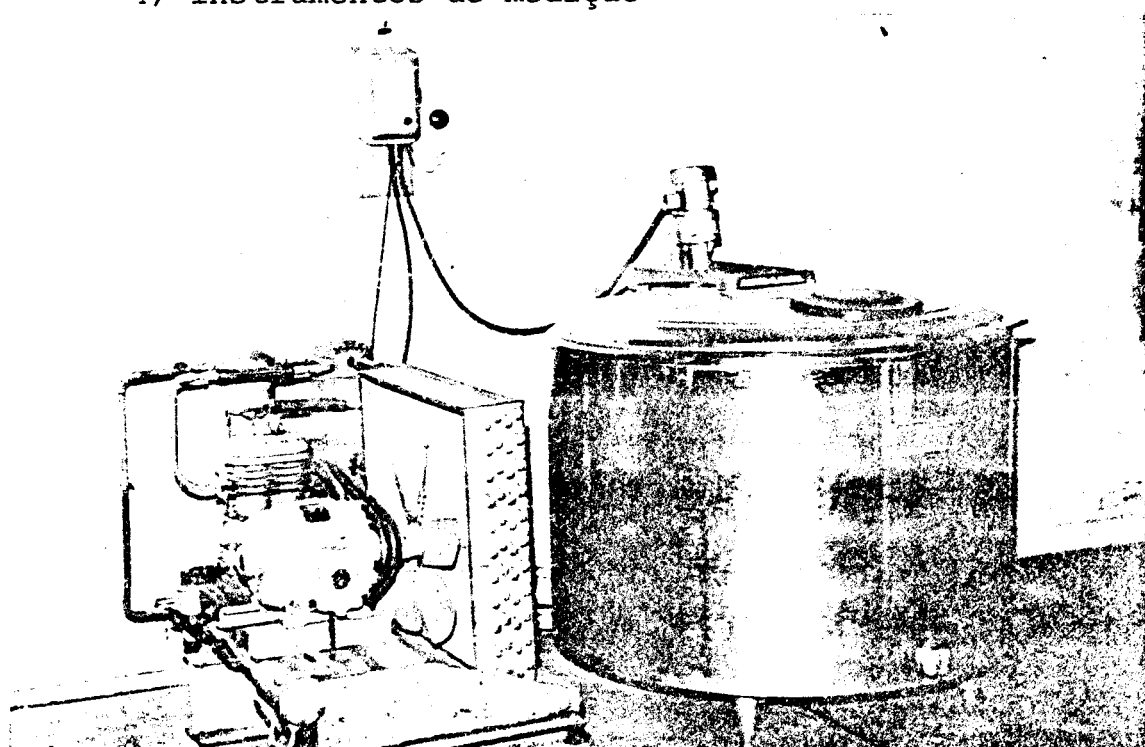
Leite bem resfriado, a temperatura de 4°C, ou pelo me- nos abaixo de 10°C, não foi encontrado de forma alguma.

Podemos afirmar, que a questão do resfriamento do lei- te, o que assegura uma qualidade adequada deste produto básico, es tá ainda longe de ser solucionada.

3.2. O equipamento (Fig. 7)

As partes do equipamento usado pertencem ao laboratório da Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola (FEAA) na UNI- CAMP, e consistem nos seguintes itens:

- 1) resfriador de leite
- 2) unidade condensadora
- 3) caldeira
- 4) instrumentos de medição



Dados do equipamento:

1) Resfriador de leite:

Tipo: tanque

Dimensões internas do tanque:

diâmetro: 1000 mm

altura: 709 mm

Capacidade: 500 litros

Fabricante: Alfa-Laval

Modelo: Nº 06

Descrição: O tanque de aço inoxidável tem um isolamento térmico de 5 cm de espessura dos lados e no fundo, e uma tampa de aço inoxidável, sobre a qual está montado um agitador acionado por um motor elétrico, através de um redutor.

Dados do motor: Fabricante: Sirem S.A.

(Villeurbanne, França)

Tipo: R 45 D 1 B

Frequência: 50 Hz

Voltagem: 220 - 380 V

Potência: 170 W

Rotação do agitador: 32/min.

Diâmetro da paleta do agitador: 420 mm

O resfriamento do tanque ocorre por expansão direta. O evaporador forma uma espiral em contato térmico com o fundo do tanque.

Dimensões do tubo de cobre do evaporador:

diâmetro externo: 16 mm

diâmetro interno: 14 mm

Detalhes sobre a distância radial entre os tubos e sua fixação ao fundo não são conhecidos; (o fabricante negou-se a fornecer tais informações).

O enchimento do tanque faz-se despejando o leite do balde através da entrada, na tampa. O esvaziamento do leite é feito pela torneira colocada junto ao fundo.

2) Unidade condensadora

Fabricante: Rádio Frigor (São Paulo)

Compressor: tipo aberto

Modelo: IV

Número de cilindros: 2

Deslocamento: 10,8 m³/h

Polia de motor: 130 mm

Número de rotações: 545/min.

Condensador: resfriado a ar

Refrigerante: R-12

Número de fabricação: DR 0373

Motor de compressor:

Modelo: T 334 - 6

Nº de fabricação: D 444402

Potência: 3 CV

Frequência: 60 Hz

Rotação: 1730/min.

Voltagem: 220/380/440 V

A válvula de expansão é do tipo termostática. A unidade condensadora é equipada por dois pressostatos de segurança: que desligam o equipamento frigorífico, se a pressão de condensação for demasiadamente alta, ou a pressão de evaporação muito baixa.

3) Caldeira

Fabricante: Indústrias de aparelhos para Sauna
(Ribeirão Preto)

Modelo: Sauna Clube

Número de fabricação: 79

A caldeira tem aquecimento a gás, ajustável manualmente.

4) Instrumentos de medição

Temperaturas

As temperaturas da água no tanque (usou-se água em lugar de leite) - mediu-se por um termômetro eletrônico:

Robinair Temperatura Tester

Modelo: 1280

Fabricante: Robinair Mfg. Corp.

Escala: - 40 até + 60°C

A temperatura do ambiente e da água no balde foi medida por um termômetro de álcool.

Escala: - 40 até + 50°C

Tipo: APEX (Japan)

Pressões:

As pressões de evaporação do equipamento frigorífico foram medidas pelo analisador:

Robinair System Analyser

US. Pat. 3.11.8.463

Escala do manômetro de sucção: "30 inches of Mercury" a vácuo até 150/lbf/in²

Calibração do manômetro:

o manômetro padrão: WIKA - Manometer

KI 0,6

Fabr.Nº: 1022050

A bomba de vácuo usada:

Robinair Vacuum Pump

Mod. 15001 Ser. DD 3478

Tempo:

Foi medido por um cronômetro.

Tipo: Sportex 7 jewels

(Swiss Made)

Trabalho de agitador:

Wattímetro

Sensitive research. The Singer CO.

Bridgepost Conn., USA

Model: UNIV NO U24127

3.3. O experimento

Devido ao fato que o leite não difere muito da água em suas propriedades térmicas e considerando que seria grande desperdício usar-se uma grande quantidade de leite para tal experiência, substituímo-lo por água. Na grande maioria dos experimentos descritos na literatura usou-se também água.

Imitando o processo usado na granja do pequeno produtor, o leite, após ordenha à mão, chega ao resfriador em baldes de 10 litros.

O nosso resfriador de capacidade de 500 litros serve para duas ordenhas de 250 litros cada uma (de manhã e à noite).

Despejando-se no resfriador um balde a cada 2,5 minutos a quantidade de uma ordenha leva, contando-se o tempo a partir do primeiro despejo:

$$\frac{240}{10} \cdot 2,5 = 60 \text{ minutos} = 1 \text{ hora}$$

Isto corresponde bem ao tempo de ordenha.

Para produzir água a 35°C, para imitar o leite recém ordenhado, usamos o vapor fornecido pela caldeira. O vapor foi diretamente introduzido no balde, misturando-o com a água fria, até chegar à temperatura prescrita. A pressão de vapor foi mantida entre 0 e 2 kgf/cm² (superpressão).

A temperatura da água no tanque foi medida imediatamente após o despejo de um balde e os manômetros foram lidos em seguida.

Terminado o despejo de 250 litros anotamos os mesmos dados em cada 15 minutos.

A experiência começou às 10 horas de manhã a 27 de junho de 1978. Às 22 horas repetimos o despejo de 250 litros de água quente no resfriador de leite (segunda ordenha), completando assim os 500 litros. Às 10 horas da manhã no dia seguinte terminou-se o experimento, ficando os 500 litros de "leite" resfriados, pronto para entrega à coleta.

No dia de experiência o Instituto Agronômico registrou
 pressão barométrica média: 711,1 mm C.Hg
 temperatura média: 19,5°C
 umidade relativa: 59,6%

3.3.1. Para os cálculos é necessário conhecer o comprimento do tubo de evaporador.

A soldagem deste tubo provocou pequenas deformações no fundo do tanque, e assim foi possível determinar aproximadamente a distância radial (a) (Fig. A.3.1) entre os tubos, e o número de voltas n dos mesmos, que formam uma espiral de Archimedes.

Segundo (30), o comprimento desta curva é

$$L_c = \frac{R}{2} [\text{rad } \theta \sqrt{1 + (\text{rad}\theta)^2} + \text{arsh} (\text{rad}\theta)] \quad (3.3.1)$$

onde

rad θ é o ângulo central, em nosso caso

$$\text{rad } \theta = n(2\pi) = 7,25 (2\pi) = 14,5\pi$$

$$a = 0,05 \text{ m}$$

$$R = a/2\pi = 0,05/2\pi = 0,00796$$

Com estes valores recebe-se da eq. (3.3.1):

$$L_c = 16,55 \text{ m}$$

3.3.2. Determinação do calor gerado pelo agitador

Medimos, pelo wattímetro, o consumo de energia do motor do agitador:

1) quando este girou no ar,

$$\dot{Q}_1 = 89 \text{ W} \quad \text{e}$$

2) quando agitou a água

$$\dot{Q}_2 = 92,5 \text{ W}$$

A diferença entre estes valores é o trabalho de agitação

$$\dot{Q}_{AGI} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 92,5 - 89 = 3,5 \text{ W} = 3,0 \text{ kcal/h}$$

A maioria da energia consumida usa-se para o acionamento do redutor, o qual reduz a rotação em grande medida, a 32/min.

3.3.3. Calibração do manômetro de sucção

O manômetro de sucção serve para determinar a pressão, e respectivamente a temperatura de evaporação (t_0) a qual é decisiva para a capacidade frigorífica do equipamento.

Para a simulação o acordo entre a t_0 medida e t_0 calculada vai ser importante.

Para a calibração as leituras do manômetro foram comparadas, em um equipamento separado, com as do manômetro padrão a princípio com valores em aumento em seguida com valores em diminuição, para eliminar o efeito de histeresis.

A fonte de pressão foi uma garrafa de refrigerante R-12.

No lado do vácuo usamos um tubo em U de mercúrio como medidor de padrão e a bomba de vácuo.

O Apêndice 1 mostra os resultados da calibração.

3.4. Modelo matemático da expansão direta

3.4.1. Aproximações

Objetiva-se um método de cálculo que dê para calcular a variação de temperatura do leite (substituído por água) em função do tempo. Os resultados da simulação deste cálculo deveriam coincidir com os da experiência.

Para economizar o tempo de computador, sendo o processo bastante complexo, foram introduzidas algumas aproximações.

As aproximações ainda são justificadas pelo fato que a capacidade frigorífica de uma unidade condensadora entende-se com uma tolerância de $\pm 5\%$, segundo a garantia dos fabricantes. Sendo este dado em primeiro lugar responsável pelo processo de resfriamento do leite, não se consideram fenômenos de pouco efeito.

- 1) Durante o resfriamento até a temperatura final a perda de calor através das paredes isoladas do tanque foi desprezada. A temperatura média do leite durante o resfriamento

$$t = \frac{35 + 4}{2} = 19,5^{\circ}\text{C}$$

Como a temperatura média durante o dia era de $19,5^{\circ}\text{C}$, podemos dizer que o calor transferido através do isolamento, era praticamente zero. Durante a parada do equipamento frigorífico, quando a temperatura do leite já tiver diminuído, a mesma perda de calor já tem mais efeito e vai ser considerada.

- 2) O equivalente de água do tanque, isto é, o calor retirado para resfriá-lo foi também desprezado. (Justificado no Apêndice 2).
- 3) Os tubos do evaporador, como já foi mencionado no item 2.4.4., formam uma espiral em bom contato térmico com o fundo do tanque. Não foi possível procurar-se um desenho técnico do equipamento, mas supõe-se que a construção aplica a prática dos congeladores domésticos, segundo a qual há uma massa entre o tubo e o fundo. Esta massa contém alumínio, assegurando assim melhor condução de calor. Na aproximação aqui feita, como mostra a Fig. A.3.1. o fundo, na largura s , tem temperatura igual a do tubo. Em seguida começa a distribuição hiperbólica de temperatura da "aleta". Nos cálculos feitos $s = 0,6$ e 16 mm foram considerados.
- 4) Uma outra aproximação aqui introduzida é que os tubos do evaporador foram considerados como retos para determinar a temperatura média do fundo do tanque.

A razão desta aproximação é que para a "aleta" reta, pode-se calcular a temperatura média segundo o método descrito no item 2.4.4. analítica e simplesmente, mas para uma aleta de espiral dever-se-ia usar um método numérico aplicado do centro até o diâmetro externo do tanque. Este cálculo daria uma carga demasiadamente grande para o computador.

Cálculos feitos (Apêndice 3) mostram que a aproximação, quando se considera o tubo como reto, é realmente bem aceitável: o desvio na temperatura média da aleta é $< 0,02^{\circ}\text{C}$.

- 5) Como foi mencionado no item 2.4.2, o coeficiente de transferência de calor entre o refrigerante em evaporação e a parede interna do tubo (h_i) varia bastante ao longo do tubo em um evaporador seco, o que é nosso caso.

A consideração deste fenômeno provocaria consumo demasiado de tempo de computador. Para o nosso objetivo basta saber a variação da temperatura média do fundo do tanque para calcular a variação da temperatura do leite; portanto, é suficiente calcular o valor médio de h_i .

Aplicamos assim a equação de Bo Pierre (9).

- 6) Durante a ordenha despeja-se no tanque 10 litros de leite em cada 2,5 minutos. Para os cálculos supõe-se que esta quantidade se mistura imediatamente com o conteúdo atual do tanque, e há um aumento incoerente de temperatura.

O tempo necessário para despejar 10 litros de água no tanque não ultrapassa 5 segundos; este tempo é desprezível ao lado de 2,5 minutos = 150 segundos, entre dois despejos.

- 7) Durante um pequeno intervalo de tempo (Δt) considera-se estado estável de transferência de calor resultando, no fim do intervalo, mudança repentina da temperatura.

É suposição geral no estudo de fenômenos transitórios, a aproximação será melhor se o intervalo de tempo for menor. Em nosso caso, durante o resfriamento (processo rápido) $\Delta t = 0,003$ h \approx 11 segundos.

- 8) Sendo a unidade condensadora resfriada a ar, sua capacidade frigorífica varia, um pouco, com a temperatura ambiente.

Durante as 24 horas da duração do experimento consideramos a temperatura média do ambiente.

- 9) Como a temperatura do "leite" (e no caso da acumulação de frio a da água também), e a do refrigerante no evaporador variam durante o processo, variam também as propriedades térmicas dos mesmos meios, efetuando-se a troca de calor. Poderíamos considerar estes efeitos, calculando Re , Pr e Gr com a temperatura atual em cada iteração. Porém, para simplificar o programa, relações foram elaboradas (Apêndices A e B).

3.4.2. Equações e sequência dos cálculos

Durante o resfriamento, o calor perdido pelo leite, isto é, transferido ao fundo e à parede do tanque é:

$$\dot{Q}_{oe} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_p = A_f h(t - \bar{t}_f) + A_p h(t - t_p) \quad \text{kcal/h} \quad (3.1)$$

Aqui
$$A_f = \frac{D_{ta}^2 \pi}{4} = \frac{1^2 \pi}{4} = 0,785 \text{ m}^2$$

mas varia

$$A_p = D_{ta} \pi m_p = D_{ta} \pi \frac{V}{D_{ta}^2 \pi / 4} = \frac{4V}{D_{ta}} = 4V \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

onde

V volume atual do leite no tanque m^3
 m_p altura do leite no tanque m

O cálculo de h foi feito com a eq. (2.7).

As propriedades térmicas da água variam bastante na faixa de temperatura do processo (entre 35°C e 4°C) e, segundo cálculos separados varia ainda o coeficiente de transferência de calor (h). O assunto é tratado no Apêndice 4 e foi elaborada a seguinte equação para calcular h em função de t:

$$h = 586,75 + 7,313 \cdot t \quad \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \quad (\text{A.4.1})$$

Para calcular \dot{Q}_{oe} , t_f e t_p devem ser também conhecidas. Estas temperaturas em cada instante, isto é, em cada intervalo de tempo, $\Delta\tau$, variam ainda em função da temperatura de evaporação (t_o) que se estabelece ao mesmo tempo.

Da aproximação Nº 7) deduz-se que se considera equilíbrio entre o calor cedido pelo leite ao fundo e à parede e o calor retirado pela unidade condensadora:

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{oe} \quad (3.3)$$

\dot{Q}_o em função de t_o é dada no catálogo do fabricante da unidade condensadora.

O catálogo da firma Rádio Frigor (S.P.):

"Capacidade frigorífica das unidades condensadoras Rádio Frigor resfriadas a ar"

dá os seguintes dados para a unidade condensadora descrita no item (3.2.2).

Temperatura: 25°C (ambiente)

temperatura de evaporação t_o (°C)	capacidade frigorífica \dot{Q}_o (kcal/h)
+5	4180
0	3540
-5	2990
+10	2420

Considerando um aumento de capacidade frigorífica de 0,5% por 1°C de abaixamento de temperatura ambiente (3), os valores acima mencionados devem ser aumentados por

$$0,5(25 - 19,5) = 2,75\%$$

Valores corrigidos:

t_o (°C)	\dot{Q}_o (kcal/h)
+5	4295
0	3637
-5	3072
-10	2487

Com interpolação de Lagrange (14) considerando os pares de valores $t_o = +5; 0; -10$, a seguinte equação foi elaborada:

$$\dot{Q}_o = 1,106 \cdot t_o^2 + 126,06 \cdot t_o + 3637 \quad \text{kcal/h} \quad (3.4)$$

Para a temperatura do tubo (t_t) temos a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{oe} = A_i h_i (t_t - t_o) \quad \text{kcal/h} \quad (3.5)$$

$$t_t = t + \dot{Q} / (A \cdot h)$$

h_i calcula-se da eq. (2.8); onde

$$G = \dot{m}_R / (d_i^2 \pi/4) \quad \text{lb/h ft}^2 \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_R = \dot{Q}_O / q_O \quad \text{lb/h} \quad (3.7)$$

Para determinar o efeito frigorífico (q_O) elaborou-se, para a faixa de t_O em questão, a seguinte equação: (Apêndice 5)

$$q_O = 28,78 + 0,116 \cdot t_O \quad (A.5.1)$$

Para simplificar os cálculos uma relação foi elaborada que dá h_i em função de t_O (Apêndice 6). Esta relação é

$$h_i = 1032 + 26,1 \cdot t_O \quad (A.6.1)$$

Segundo aproximação 3), (3.4.1) acima do tubo e entre os tubos a temperatura média da "aleta" calcula-se das eqs. (2.15) e 2.16 e finalmente, a temperatura média do fundo do tanque, da eq. (A.3.2).

A temperatura média da parede (t_p) calcula-se segundo a eq. (2.15).

Elaborou-se o programa de computador em Fortran Básico. O fluxograma é apresentado no Apêndice 10 e o programa próprio no Apêndice 12.

A sequência dos cálculos é como segue: com as equações mencionadas o método de cálculo da capacidade frigorífica (\dot{Q}_O) que se estabelece durante qualquer Δt tempo, é um método iterativo, admissíveis um valor de tentativa para t_O . Com a sequência no fluxograma do programa (Apêndice 10) após a instrução N° 10, verificamos se $\dot{Q}_{Oe} = \dot{Q}_O$. Repetimos o cálculo até esta igualdade estará satisfeita dentro da tolerância.

Para economizar tempo de computador aplicamos a iteração por aproximação gradual, segundo o Apêndice 7.

Haveria a possibilidade da solução do mesmo sistema de equações (as quais nem todas são lineares) com uma combinação do método de Newton-Raphson e da eliminação de Gauss. Este método se

tem que tenha sido todo o seu programa publicado (15), exige certas condições e por isso não foi aplicado.

O passo seguinte é o cálculo do calor transferido através da tampa (\dot{Q}_{tam}) (Instrução Nº 50 do programa).

Através da tampa o leite recebe calor do ar ambiente, quando sua temperatura for mais baixa que a deste ambiente. (Antes disso o leite perde calor para o ambiente, isto é, \dot{Q}_{tam} vai ser negativo).

$$\dot{Q}_{tam} = \frac{D^2 t_a \pi}{4} U_{tam} (t_a - t) \quad \text{kcal/h} \quad (3.8)$$

onde

$$1/U_{tam} = 1/h_e + s_{ar}/k' \quad (3.9)$$

k' é a condutividade térmica equivalente, que contém o efeito de convecção, condução e radiação (eq. (2.11)).

Em nosso caso, como vamos ver, a temperatura do leite é, apenas durante pouco tempo, superior à temperatura do ambiente. Durante a maioria do tempo de resfriamento ela é inferior à temperatura do ambiente.

Como a temperatura da camada do ar entre o nível do leite e tampa, mais baixa perto do leite, o efeito da convecção, caso exista, pode ser muito pequeno. A referência (11) não diz nada a respeito desta direção de transferência de calor, a qual desprezaremos.

Será assim da eq. (2.11)

$$k' \cong k_{ar} + k_r \quad (3.10)$$

e k_r é determinada pela eq. (2.13).

Onde

T_1	temperatura absoluta da tampa	$^{\circ}\text{K}$
T_2	" " do leite	$^{\circ}\text{K}$

O calor cedido pelo ambiente para a tampa:

$$\dot{Q}_{tam} = \frac{D_{ca}^2}{4} h_e (t_a - t_{tam}) \quad (3.11)$$

Temos assim 5 equações: (3.8), (3.11), (3.10), (2.13), (3.9) nas quais as 5 incógnitas (\dot{Q}_{tam} , U_{tam} , k' , k_p , t_{tam}) são determinadas, e o cálculo de \dot{Q}_{tam} é possível.

Após substituição sucessiva recebemos, para calcular t_{tam} a seguinte equação:

$$C_{12} \frac{(t_{tam} - 273)^4}{100} + \left(\frac{k_{ar}}{s_{ar}} + h_e \right) t_{tam} - \left(C_{12} \left(\frac{t+273}{100} \right)^4 + h_e t_a + \frac{k_{ar}}{s_{ar}} t \right) = 0 \quad (3.12)$$

O fator de emissividade mútua (C_{12}) calcula-se da eq. (2.14).

Para aço inoxidável (não polido), (13)

$$\epsilon_1 = 0,12$$

e para leite, usando o valor do verniz branco, (13)

$$\epsilon_2 = 0,95$$

$$e \quad C_s = 4,96 \cdot 10^{-8} \quad \text{kcal/m}^2 \text{h}^{\circ}\text{K}^4$$

$$C_{12} = \frac{4,96 \cdot 10^{-8}}{1/0,12 + 1/0,95 - 1} = 0,59 \cdot 10^{-8} \quad \text{kcal/m}^2 \text{h}^{\circ}\text{K}^4$$

Na eq. (3.12) $C_{12} = 0,59$, porque 10^{-8} é considerado junto com as temperaturas $(T/100)^4 = T^4 \cdot 10^{-8}$.

O valor de k_{ar} (13)

\bar{a}	0°C	$k_{ar} = 0,021$	$\text{kcal/m h}^{\circ}\text{C}$
\bar{a}	50°C	$k_{ar} = 0,024$	"

A temperatura média do ar durante o resfriamento varia

$$k_{ar} = 0,022 \quad \text{kcal/m h } ^\circ\text{C}$$

Para $h_e = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$ é geralmente usado.

s_{ar} varia com a quantidade de leite no tanque, usa-se nos cálculos o valor atual:

$$s_{ar} = 0,709 - 0,00127 \cdot V \quad \text{m} \quad (3.13)$$

onde 0,709 é a altura interna do tanque.

V volume de leite no tanque, litros

0,00127 é a altura ocupada no tanque por um litro de leite

Para solucionar a eq. (3.12) o programa aplica de novo o método de aproximação gradual descrito no Apêndice 7.

Conhecendo t_{tam} calcula-se \dot{Q}_{tam} da eq. (3.11).

O abaixamento da temperatura do leite (Δt) durante $\Delta \tau$ tempo, determinado pelo balanço de calor do leite,

$$(\dot{Q}_{ce} - \dot{Q}_{tam} - \dot{Q}_{AGI}) \Delta \tau = V \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta t \quad (3.14)$$

A temperatura do leite para o seguinte intervalo $\Delta \tau$ será

$$t = t - \Delta t \quad (\text{Instrução N}^\circ 80 \text{ do programa})$$

A sequência dos cálculos se repete por diante e a temperatura do leite em função do tempo será determinada.

Completamos os cálculos considerando:

1) O efeito dos despejos: (Instrução N^o 100 do programa) em cada 2,5 minutos a temperatura do leite aumenta por causa da introdução de 10 litros a 35^oC. A nova temperatura do leite será

$$t = t + \frac{10 \cdot 35}{V + 10} \quad ^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

onde V é o volume do leite antes do despejo.

- 2) Se $V = 250 \text{ l}$ (após a ordenha da manhã) ou se $V = 500 \text{ l}$ (após a ordenha da noite), não há mais despejo, e a temperatura do leite baixa rapidamente.
- 3) Se a temperatura do leite atingir a temperatura final (4°C), o resfriamento termina (o termostato manda parar a unidade condensadora) e no cálculo entra $\dot{Q}_0 = 0$ (Instrução Nº 170 do programa). Neste caso ocorre lento aumento da temperatura do leite, por causa da perda de calor (perda de frio) através do isolamento (\dot{Q}_{tr}), da tampa (\dot{Q}_{tam}), e pelo trabalho do agitador (\dot{Q}_{AGI})

$$\dot{Q}_{\text{trp}} = A_p U (t_a - t) \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_{\text{trf}} = A_f U (t_a - t) \quad (3.17)$$

O calor total recebido pelo leite:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{tam}} + \dot{Q}_{\text{trp}} + \dot{Q}_{\text{trf}} + \dot{Q}_{\text{AGI}} \quad (3.18)$$

Nas equações (3.16) e (3.17) considerando isolamento térmico com polistireno

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \left(\frac{\delta}{k}\right)_{\text{is}} + \frac{1}{h} = \frac{1}{7} + \frac{0,05}{0,03} + \frac{1}{616} = 1,811 \quad (3.19)$$

$$U = 0,552 \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^{\circ}\text{C}$$

Após a parada do equipamento frigorífico, para economizar tempo de computador, $\Delta\tau = 0,25 \text{ h}$ que é satisfatório durante o lento aumento da temperatura do leite.

3.5. Acumulação

O objetivo desta parte do trabalho é verificar, por meio de um programa de computador modificado, se a introdução do conceito da acumulação de frio traria vantagem.

O tanque de leite tem uma camisa cheia de água e os tubos de evaporador encontram-se na mesma.

3.5.1. Dimensionamento do evaporador

O comprimento do evaporador deve ser tal, que possibilite a formação de gelo na quantidade necessária entre duas ordenhas.

A capacidade frigorífica média do equipamento frigorífico calcula-se da seguinte equação:

$$\bar{Q}_c = \frac{\dot{m} (t_{ic} - t_{fin})}{24} \cdot 1,2 = \frac{500(35 - 4)}{24} \cdot 1,2 = 775 \quad \text{kcal/h} \quad (3.20)$$

onde o fator 1,2 corresponde às perdas de calor estimadas.

Admitindo o tempo de resfriamento da primeira ordenha: $\tau_R = 3$ h a partir do último despejo desta ordenha e 25°C temperatura de leite, ao mesmo tempo, o calor retirado para atingir $t=4^\circ\text{C}$, será

$$\underline{Q}_1 = V \cdot c (t - 4) \cdot 1,05 = 250 \cdot 1(25 - 4) \cdot 1,05 = 5513 \text{ kcal}$$

onde a perda do resfriador foi estimada 5% durante este período.

Durante o resfriamento o equipamento frigorífico retira $\bar{Q}_c \tau_R$ (kcal), o calor retirado por acumulação deve ser

$$\underline{Q}_{ac} = \underline{Q}_1 - \bar{Q}_c \tau_R = 5513 - 775 \cdot 3 = 3188 \quad \text{kcal} \quad (3.22)$$

Durante este processo a água da camisa se aquece por (Δt_R) e uma certa quantidade de gelo (m_g') descongela. Do balanço de calor segue

$$Q_{ac} = q_g m_g' + C_A (\Delta t_A) m_A \quad (3.23)$$

Admitindo o diâmetro máximo do gelo $D_2 = 50$ mm a camisa tenha uma largura de 80 mm e no lado do tanque uma altura de 600 mm. O volume total desta camisa é 250 ℓ e deduzindo algum volume ocupado pelo tubo de evaporador o enchimento de água pode ser 223 ℓ, isto é, a massa da água mais gelo ($m_A + m_g$) será sempre 223 kg.

Selecionando-se tubo de cobre 1/2" ($d_e = 12,7$ mm, $d_i = 11,12$ mm) e considerando uma temperatura de evaporação média de $t_o \cong -5^\circ\text{C}$,

o volume específico do R-12 vapor (saturado na saída)

$$v'' = 0,06635 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (8)$$

$$\text{eq. (A.5.1): } q_o = 28,76 + 0,114(-5) = 28,19 \quad \text{kcal/kg}$$

$$\text{eq. (3.7): (unidades métricas) } \dot{m}_R = 775/28,19 = 27,49 \quad \text{kg/h}$$

$$\text{eq. (3.6): } G = 27,49 / (0,01112^2 \pi/4) = 2,831 \cdot 10^5 \quad \text{kg/h m}^2$$

$$\text{a velocidade do R-12: } c = \frac{Gv''}{3600} = 2,831 \cdot 10^5 \frac{0,06635}{3600} = 5,22 \text{ m/s}$$

Esta velocidade é adequada (do ponto de vista de h_i e do retôrno de óleo), a seleção do tubo é justificada.

Admitindo ainda o comprimento do tubo $L_t = 40$ m, a quantidade do gelo é

$$\begin{aligned} m_{g\max} &= (D_2^2 - d_e^2) (\pi/4) L_t \rho_g = \\ &= (0,05^2 - 0,0127^2) (\pi/4) 40 \cdot 917 = 67,37 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.24)$$

A massa de água na camisa neste caso é

$$m_{A\min} = (m_A + m_g) - m_{g\max} = 223 - 67,37 = 155,63 \quad \text{kg}$$

Substituindo este valor na eq. (3.23) e admitindo ainda $(\Delta t_A) = 5^\circ\text{C}$, a massa de gelo que deve descongelar durante o res-

friamento será

$$m_g' = (Q_{ac} - m_A c_A (\Delta t_A)) / q_g = (3188 - 155,63 \cdot 1 \cdot (5)) / 79,5 =$$

$$= 30,31 \text{ kg}$$

que corresponde (da eq. (3.24)) a um diâmetro do gelo de $D = 38,05$ mm, isto é, fica uma espessura $(38,05 - 12,7) / 2 = 12,6$ mm de gelo no tubo, para segurança. A massa do gelo descongelado durante $\Delta \tau$ tempo quando o diâmetro (D) diminui por ΔD

$$\Delta m_g = D\pi (\Delta D/2) L_t \rho_g \quad \text{kg} \quad (3.25)$$

Eq. (3.33) para calcular ΔD é construída de tal maneira que em congelamento ΔD será positivo; assim Δm_g (eq. (3.25)) será positivo também, o programa calcula corretamente:

o novo diâmetro de gelo como

$$D = D - \Delta D \quad (3.26a)$$

e a nova massa de gelo como

$$m_g = m_g - \Delta m_g \quad (3.26b)$$

Como podemos ver muitos dados são admitidos neste dimensionamento. Naturalmente estes valores não podem ser totalmente arbitrários; as nossas tentativas foram tomadas após a execução de alguns cálculos pelo computador.

3.5.2. Equações e sequência dos cálculos

No momento do primeiro despejo as condições iniciais ($\tau=0$) são:

temperatura do "leite": $t = 35^\circ\text{C}$

temperatura da água: $t_A = 0,1^\circ\text{C}$

(valor admitido, o qual será fiscalizado pelos cálculos que seguem)

diâmetro do gelo no evaporador: $D = D_2 = 0,050 \text{ m}$

O calor perdido pelo leite a água da camisa através do fundo do tanque é

$$\dot{Q}_f = A_f U_{fac} (t - t_A) \quad \text{kcal/h} \quad (3.27)$$

e o calor transmitido através da parede do tanque é

$$\dot{Q}_p = A_p U_{pac} (t - t_A) \quad \text{kcal/h} \quad (3.28)$$

Cálculos efetuando a parte mostraram (Apêndice 8) que U_{fac} e U_{pac} não ficam constantes, mas variam em primeiro lugar com a temperatura do leite.

Elaborou-se as seguintes equações:

$$U_{pac} = 80,5 + 3,38 \cdot t \quad (A.8.2)$$

$$U_{fac} = 33,48 + 1,21 \cdot t \quad (A.8.3)$$

Após $\Delta\tau$ tempo a temperatura de leite será

$$t - \Delta t ,$$

onde Δt é determinada pelo balanço de calor do leite

$$(\dot{Q}_f + \dot{Q}_p - \dot{Q}_{tam} - \dot{Q}_{AGI}) \Delta\tau = \Delta\dot{Q} \cdot \Delta\tau = \dot{Q}_l \cdot C_l \cdot \Delta t \quad (3.29)$$

O calor transmitido através da tampa (\dot{Q}_{tam}) calcula-se igualmente, como foi mostrado anteriormente (3.4.2).

A temperatura da água após $\Delta\tau$ tempo será

$$t_A + \Delta t_A ;$$

onde Δt_A determina-se com eq. (2.2.1), substituindo $\Delta\tau$ em vez de dt e Δt_A em vez de dt_A .

$$\Delta t_A = (\dot{Q} - \dot{q}_1 L_t) \Delta\tau / m_A c_A \quad ^\circ\text{C} \quad (3.30)$$

Aqui \dot{q}_1 é determinada pela eq. (2.17)

$$\dot{q}_1 = (D\pi) h_{Ag} (t_A - 0) \quad \text{kcal/h m}$$

O coeficiente de transferência de calor entre água e gelo (h_{Ag}) não fica constante durante o processo. Cálculos separados (Apêndice 9) mostraram que o mesmo é função da temperatura da água e do diâmetro do gelo.

Elaborou-se a seguinte relação:

$$h_{Ag} = 160,48 - 1207,41D + 17,19t_a - 125,93Dt_A \quad (\text{A.9.3})$$

O calor transmitido do ambiente à água de resfriamento

$$\dot{Q}_{tr} = (A_p + A_f) U (t_a - t_A) \quad \text{kcal/h} \quad (3.31)$$

onde U foi determinado pela eq. (3.19).

O calor total recebido pela água de resfriamento (do leite e do ambiente) é:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_f + \dot{Q}_{tr} \quad (3.32)$$

Finalmente varia também o diâmetro do gelo (D), o mesmo será, após $\Delta\tau$ tempo, $D - \Delta D$, onde ΔD é determinado com eq. (2.19), substituindo $\Delta\tau$ em vez de $d\tau$ e ΔD em vez de dD .

Expressando ΔD :

$$\Delta D = (2(D \cdot h_{Ag} \cdot t_A - U_1^* (-t_o) / \pi) / (D \cdot \rho_g \cdot g)) \Delta\tau \quad (3.33)$$

Nesta equação somente a temperatura de evaporação (t_o) é ainda desconhecida.

No item 2.5 já foi mencionado que a temperatura de evaporação, a qual se estabelece em qualquer tempo, é consequência do balanço entre compressor e evaporador: eq. (2.22) e eq. (3.32) devem ser satisfeitas simultaneamente. (Em princípio o raciocínio é o mesmo, como em 3.4.2).

Do catálogo da mesma firma (Rádio-Frigor S.A., São Paulo) temos os seguintes dados da unidade condensadora:

Modelo do compressor: II
 rotação do mesmo: 510/min.
 polia do motor: 85 mm
 deslocamento: 2,32 m³/n
 potência do motor: 0,5HP
 condensador resfriado a ar

A capacidade frigorífica à temperatura ambiente 25°C será:

temperatura de evaporação t_o (°C)	capacidade frigorífica \dot{Q}_o (kcal/h) (do catálogo)	capacidade frigorífica corrigida (vê (3.4.2))
0	1105,00	1135,00
-10	655,00	673,00
-20	465,00	478,00

Como no item 3.4.2 foi elaborada, pela interpolação de Lagrange, a seguinte relação

$$\dot{Q}_o = 1,334 t_o^2 + 59,55 t_o + 1135,0 \quad \text{kcal/h} \quad (3.34)$$

Dos dados de catálogo da unidade condensadora foi selecionada na base que a sua capacidade frigorífica, em $t_o \approx -5 \dots -10^\circ\text{C}$ seja perto à \bar{Q}_o , determinada pela eq.(3.20).

Quanto a eq. (2.22), temos:

$$\dot{Q}_{oe} = \dot{q}_2 L_t$$

U_1^* é função de h_i (coeficiente de transferência de calor no interior do tubo), mas este varia também.

No Apêndice 6 elaborou-se a relação entre h_i e t_o (aqui chamado h_{iac}) e t_o como segue

$$h_{iac} = 501,7 + 19,44 t_o \quad (\text{A.6.2})$$

Com estas equações elaborou-se o programa de computador. O fluxograma é apresentado no Apêndice 11, e o programa próprio no

A sequência de cálculos é como segue:

Em primeiro lugar (Instrução Nº 11) calculamos a capacidade frigorífica (\dot{Q}_0), que se estabelece durante Δt tempo. É um cálculo iterativo, semelhante ao programa de expansão direta, porém as equações aplicadas são diferentes. No fluxograma as equações são marcadas.

Conhecendo \dot{Q}_0 calculamos o calor recebido pelo leite através da tampa (\dot{Q}_{tam}), (Instrução Nº 50). Este cálculo é igual ao programa da expansão direta.

Depois, com Instrução Nº 120, calculamos as variações que ocorrem durante este intervalo, e determinamos para o seguinte Δt tempo:

- a temperatura do leite (t),
- a temperatura da água (t_A) e
- o diâmetro do gelo (D).

Desta maneira podemos seguir as variações de t , t_A , D em função do tempo.

O programa ainda é completado pelos seguintes itens:

- 1) Os despejos durante as ordenhas são considerados igualmente ao programa da expansão direta. (Instrução Nº 170).
- 2) Consideramos um automatismo que manda parar o equipamento frigorífico quando o diâmetro máximo de gelo (D_g) for restabelecido. (Instrução Nº 190).
- 3) Se a temperatura do leite for mais baixa que 4°C , o processo será lento e o intervalo de tempo é modificado para $\Delta t = 0,25$ h em vez de $\Delta t = 0,003$ h na outra parte do processo. (Instrução Nº 90).
- 4) Se todo o gelo for descongelado ($D = d_g$) haverá, maior aumento da temperatura da água (t_A), porém o programa funciona. Isto pode ocorrer por exemplo por uma supercarga do resfriador. (Instrução Nº 130).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Do experimento

Os resultados experimentais são mostrados nas Tabelas A.1 e A.2. O tempo (τ), a temperatura do "leite" (t) e a pressão de sucção (pressão de evaporação, p_0) são valores lidos durante o experimento.

A pressão de evaporador corrigida (p_{oc}) foi determinada pelos dados da calibração do manômetro (Apêndice 1), e daí a temperatura de evaporação (t_0), isto é, a temperatura de saturação correspondente a p_{oc} , foi calculada da equação de Eiseman e col., citada em (32),

$$\lg p = 39,88381727 - 3436,632228 / T - 12,47152228 \lg T + 0,00473T \quad (4.1)$$

onde as dimensões são: T(°R) e p(psia).

Determinou-se t_0 desta equação pelo método de Newton-Raphson.

A Fig. A.1, mostra a variação da temperatura do "leite" durante todo o experimento.

Pode-se somar os resultados principais como segue, separando as quatro fases de operação:

1a. Fase: Despejo da 1a. ordenha (ordenha de manhã):

Duração: 1 h

- A temperatura de leite (t) estabeleceu-se ao redor de 20°C
- A temperatura de evaporação (t_0) variava entre 3 e 2°C.

2a. Fase: Resfriamento e manutenção da temperatura do leite.

Duração: 11 h, quantidade do leite: 250 litros.

- A temperatura final, 4°C foi atingida após 1 hora e 30 minutos, contados a partir do começo desta fase. Durante este período a temperatura de evaporação diminuiu gradativamente de 1,3°C à -9,5°C. Então o termostato desligou o equipamento frigorífico.

A queda da pressão de evaporação após o desligamento pelo termostato é consequência do sistema de controle: o termostato desliga uma válvula magnética no tubo de líquido, por isso o abastecimento do evaporador com refrigerante pára; o compressor faz sucção do evaporador até uma pressão baixa ($p_0 \approx 0$ psig), quando o termostato de baixa desliga a unidade condensadora.

- Após a parada da unidade condensadora o leite se esquentou lentamente até $4,5^{\circ}\text{C}$ no fim desta fase. Como a diferença do termostato foi ajustada a 2°C (ligação a 6°C), o equipamento frigorífico ficou parado.

3a. Fase: Despejo da segunda ordenha (ordenha de noite)

Duração: 1 h

- A temperatura do "leite" aumentou até 13°C , mesmo com o equipamento frigorífico em operação. O mesmo foi ligado pelo automatismo após o terceiro despejo.
- A temperatura de evaporação aumentou de $-9,5^{\circ}\text{C}$ até $-3,9^{\circ}\text{C}$.

4a. Fase: Resfriamento e manutenção da temperatura do "leite".

Duração: 11 h, quantidade de "leite": 500 litros.

- A temperatura do "leite" cai rapidamente. A temperatura final de 4°C foi atingida após 1 hora e 45 minutos quando o equipamento frigorífico se desligou.
- Durante este período a temperatura de evaporação variava entre $-3,9^{\circ}\text{C}$ e $-10,4^{\circ}\text{C}$.
- Após a parada da unidade condensadora o "leite" se esquentou lentamente até $4,8^{\circ}\text{C}$. O equipamento frigorífico ficou parado.

(Os resultados experimentais ainda são mostrados nos gráficos das Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5).

4.2. Da simulação (expansão direta)

Como a execução do contato térmico entre tubo de evaporador e fundo do tanque não é conhecida (vê Fig. A.3.1), foram feitos cálculos com diferentes arranjos: variamos a largura s (Fig. A.3.1), na qual consideramos a temperatura do fundo como igual à temperatura de tubo, também consideramos a tolerância na capacidade frigorífica da unidade condensadora, com 100, 95 e 90% em relação aos dados de catálogo.

Os resultados mais característicos destes cálculos são apresentados na Tabela A.3.

Segundo esta tabela, $\dot{Q}_0 = 95\%$ e $DIS = 0,022$ m ($s=0,006$ m) dão o melhor acordo com os dados experimentais, (Tabelas A.1 e A.2). Esta situação é demonstrada nas Figuras A.2, A.3, A.4, A.5, quais apresentam a variação da temperatura do "leite" em função do tempo, calculada pelo computador nas diferentes fases de operação. As linhas tracejadas mostram os resultados experimentais.

As oscilações na temperatura do "leite" por causa dos despejos não puderam ser seguidas por medições, que, como foi mencionado no item 3.3, foram lidas após os despejos. Apenas do começo do experimento, quando a prática de leituras ainda não estava bastante desenvolvida, encontram-se alguns pontos fora da oscilação dos resultados de cálculo.

Na Tabela 4, comparamos além das temperaturas de "leite", ainda a temperatura de evaporação (t_0) entre o cálculo e experimento nos momentos mais característicos do processo.

Considerando que o fenômeno é bastante sofisticado, acha-se que o acordo entre os resultados experimentais, e as do cálculo é satisfatório.

4.3. Da acumulação

Com o programa elaborado em 3.6 e mostrado nos Apêndices 11 e 13 foram feitos diversos cálculos pelo computador, com diferentes valores dos seguintes parâmetros principais:

- Diâmetro máximo do gelo (D_2)
- Comprimento do tubo de evaporador (L_t)
- Capacidade frigorífica da unidade condensadora (\dot{Q}_0).

Os resultados são apresentados na Tabela A.4 e nas Figuras A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12.

Explicações à Tabela A.4:

- 1) As colunas, "250ℓ" e "500ℓ" mostram a temperatura do "leite" (t) e o diâmetro do gelo (D) no fim das ordenhas, após o despejo dos últimos 10 litros.
- 2) Nas colunas " $t=10^\circ\text{C}$ " e " $t=4^\circ\text{C}$ " o tempo (τ) e o diâmetro de gelo (D) são indicados, quando estas temperaturas importantes foram atingidas.
- 3) $\tau=0$: começo da 1a. ordenha,
 $\tau=12$ h: começo da 2a. ordenha,
 $\tau=24$ h: fim do processo.

Os resultados de $\dot{Q}_0 = 90\%$ e 110% são tão pertos aos de $\dot{Q}_0 = 100\%$ que não se apresentou.

As Figuras mencionadas, todas elas referem-se ao caso:

diâmetro máximo de gelo: $D_2 = 0,05$ m
 comprimento do tubo de evaporador: $L_t = 40$ m

As Figuras A.6, A.7, A.8 mostram as temperaturas de "leite" (t ou T); as Figuras A.9, A.10, A.11, A.12 mostram a temperatura de água de resfriamento na camisa (TAG) e o diâmetro de gelo (D) nas diferentes fases do processo.

Tabela 4 - Resultados da simulação e o experimento. (Expansão direta)

Simulação	Q _g =250 (litros)		t=10 (°C)		t=4 (°C)		τ=12 (h)	Q _g =500 (litros)		t=10 (°C)		t=4 (°C)		τ=24 (h)
	Q _o (%)	t (°C)	τ (h)	t _o (°C)	τ (h)	t _o (°C)	t (°C)	t (°C)	t _o (°C)	τ (h)	t _o (°C)	τ (h)	t _o (°C)	t (°C)
DIS (m)														
95	0,022	20,2	1,8	-5,3	2,3	-9,6	4,9	14,0	-2,1	13,7	-4,8	14,8	-9,7	4,6
Experimento		20	1,82	-4,7	2,5	-9,54	4,5	13,0	-3,9	13,6	-5,6	14,75	-9,5	4,8

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

- 5.1. Uma viagem acompanhando o recolhimento do leite nos arredores de Campinas, forneceu informações muito desfavoráveis: o resfriamento do leite nas granjas em parte não é efetuado de modo algum ou, quando praticado é feito insatisfatoriamente, mesmo considerando-se que a maioria da quantidade recolhida era do tipo B.
- 5.2. Um resfriador de leite de tanque, de expansão direta com capacidade de 500 litros por dia, produto nacional, foi testado no laboratório. O equipamento mostrou características favoráveis do ponto de vista do tempo de resfriamento e manutenção da temperatura do leite, não havendo o perigo de congelamento.
- 5.3. Um modelo matemático e programa em Fortran Básico foram elaborados e os cálculos executados pelo computador para a simulação de todo o processo.
Como nem todos os detalhes de construção são conhecidos, várias soluções foram testadas pelos cálculos e uma delas demonstrou especialmente bom acordo, com os resultados experimentais.
- 5.4. Verificou-se teoricamente ainda uma modificação da construção atual, aplicando o conceito da acumulação de frio pela formação do gelo na superfície do evaporador colocado na água, na camisa do tanque. Elaborou-se um segundo programa de computador para este caso, e dos cálculos feitos pode-se concluir os seguintes itens:
 - 5.4.1. A capacidade do equipamento frigorífico de acumulação é menor que 1/3 da capacidade frigorífica do equipamento atual. Acredita-se que a economia, por isso, ultrapassa o aumento dos custos em vista da modificação do resfriador, possibilitando uma diminuição do custo de investimento.

5.4.2. O resfriamento do leite é mais lento que na expansão direta, porém, a temperatura de 10°C é atingida, em todos os casos, dentro de 1,7 horas após a 1a. ordenha e dentro de 0,9 h após a 2a. ordenha, e a 4°C dentro de 4,3 horas após a 1a. ordenha e dentro de 3,9 h após a segunda ordenha. Considerando as exigências do IIF (item 2.1.2) estes resultados, são certamente aceitáveis. Além disso, entre duas ordenhas o leite atinge uma temperatura mais baixa e pode ser entregue à coleta abaixo de 1°C . Durante 14, das 24 horas do dia, a temperatura do leite fica abaixo de 4°C , temperatura mínima com expansão direta.

Acredita-se que do ponto de vista da qualidade do leite a acumulação não pode ser inferior à expansão direta.

5.4.3. O experimento não foi estendido para verificar o consumo de energia, porém, os resultados permitem o seguinte raciocínio:

O calor total retirado por dia é maior, no caso da acumulação, por causa da temperatura final mais baixa do leite. A menor unidade condensadora tem geralmente um "coeficiente menor de performance" (capacidade frigorífica em relação ao consumo de energia). Estas circunstâncias provocam maior consumo de energia pela acumulação, mas, a temperatura de evaporação média é mais alta e atua em direção contrária. Pode-se esperar que a diferença no consumo de energia não seria significativa. Como a pequena unidade condensadora pode ser monofásica, isso traz a vantagem nos locais onde a ligação trifásica não é disponível.

5.4.4. Os principais parâmetros do sistema de acumulação, o diâmetro máximo do gelo, o comprimento do tubo do evaporador e a capacidade frigorífica da unidade condensadora não têm grande influência na variação de temperatura do leite. Há a possibilidade da otimização.

5.5. O problema do resfriamento econômico do leite nas granjas necessita uma colaboração entre instituições governamentais, produtores e indústria de equipamentos, como mostra o exemplo da França, onde esta questão foi solucionada com sucesso na década passada.

SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Quantidade</u>	<u>Unidade no sistema prático</u>
a	distância	m
A	superfície	m ²
c	calor específico	kcal/kg °C
C _s	fator de radiação do corpo negro	kcal/m ² h ^o K ⁴
d	diâmetro do tubo do evaporador	m
D	diâmetro externo do gelo	m
D	diâmetro	m
g	aceleração da gravidade	m/s ²
h	coeficiente de transmissão de calor	kcal/m ² h °C
k	condutividade térmica	kcal/m h °C
L	comprimento	m
\dot{m}	fluxo de massa	kg/h
m	massa	kg
m	distância	m
N	rotação do agitador	1/min
\dot{q}	fluxo de calor	kcal/h m
\dot{Q}	carga térmica	kcal/h
s	espessura	m
t	temperatura do leite	°C
U	coeficiente global de transferência de calor	kcal/m ² h °C

Letras gregas

β	coeficiente de expansão volumétrica	1/°C
γ	peso específico	kg/m ³
δ	espessura	m
ρ	densidade	kg/m ³
ϵ_1	fator de emissividade	
ϵ_2	fator de emissividade	
μ	viscosidade dinâmica	kg/h m
τ	tempo	h

Índices

a	ambiente
ac	acumulação
al	aleta
ap	aparente
ar	ar
A	água
Ag	água-gelo
AGI	agitador
e	externa
f	fundo
fin	final
fr	referência
g	gelo
gl	gelo-leite
i	interna
ic	inicial
l	leite
o	propriedade da evaporação
p	pressão
p	parede
PA	parede-água
R	refrigerante
s	superfície
sg	superfície do gelo
t	tubo
ta	tanque
tam	tampa
v	vapor

Grupos adimensionais

Gr	número de Grashof	=	$(L^3 \rho^2 g \beta \Delta t) / \mu^2$	
Nu	número de Nusselt	=	$C(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n$	para convecção natural
Nu	número de Nusselt	=	$C \text{Re}^m \text{Pr}^n (\mu/\mu_s)^{0,14}$	para convecção forçada
Pr	número de Prandtl	=	$c \mu / k$	
Re	número de Reynolds	=	$L^2 N \rho / \mu$	

APÊNDICE 1Calibração do mano-vácuo-metro de sucção

Identificação do manômetro: 3.2/4

Método de calibração: 3.3.3.

Manômetro a calibrar	Leituras		Valores corrigidos (médio)
	Manômetro padrão		
	em aumento	em diminuição	
Superpressão (psig)	(psig)	(psig)	(psig)
3	2	1,8	1,9
6	4,8	4,8	4,8
9	8	8,2	8,1
12	10,3	10	10,15
15	13,5	13,5	13,5
18	16,6	16,6	16,6
21	19,7	19,3	19,5
24	22,7	22,6	22,65
27	25,5	25,5	25,5
30	28,3	28,2	28,25
33	30,3	30,9	30,6
36	34	34,2	34,1
39	37,2	37	37,1
Vácuo (pol.C.Hg)	(cm C.Hg)		(pol.C.Hg)
+15	0		0
- 5	-28		-11,02
-10	-33		-12,99
-15	-38		-14,96

APÊNDICE 2

Consideração do equivalente de água do tanque

Supondo-se uma espessura de 1,5 mm de aço inoxidável, a massa do tanque é:

$$m_t = A \delta \gamma = \left(\frac{12\pi}{4} + 1\pi \cdot 0,71 \right) \frac{1,5}{1000} \cdot 8000 = 36,19 \text{ kg}$$

Resfriando-se o tanque entre 19,5°C e 4°C durante pelo menos 2 horas, o calor retirado por hora é:

$$\dot{Q}_t = \frac{1}{2} m_t C (19,5 - 4) = \frac{1}{2} 36,19 \cdot 0,15 (19,5 - 4) = 42 \text{ kcal/h}$$

O qual em relação à capacidade frigorífica

$$\dot{Q}_o \approx 3500 \text{ kcal/h, pode ser desprezado}$$

APÊNDICE 3

A temperatura média do tanque

Segundo o item 3.4.1 no cálculo de \bar{t}_f aplicamos as seguintes aproximações:

- 1) na largura "s" (Fig. A.3.1)

$$t_f \cong t_t ;$$

- 2) entre os tubos, na "aleta" calculamos a temperatura média (t_{al}) como se os tubos fossem retos;
- 3) desprezamos a transferência de calor do lado do isolamento.

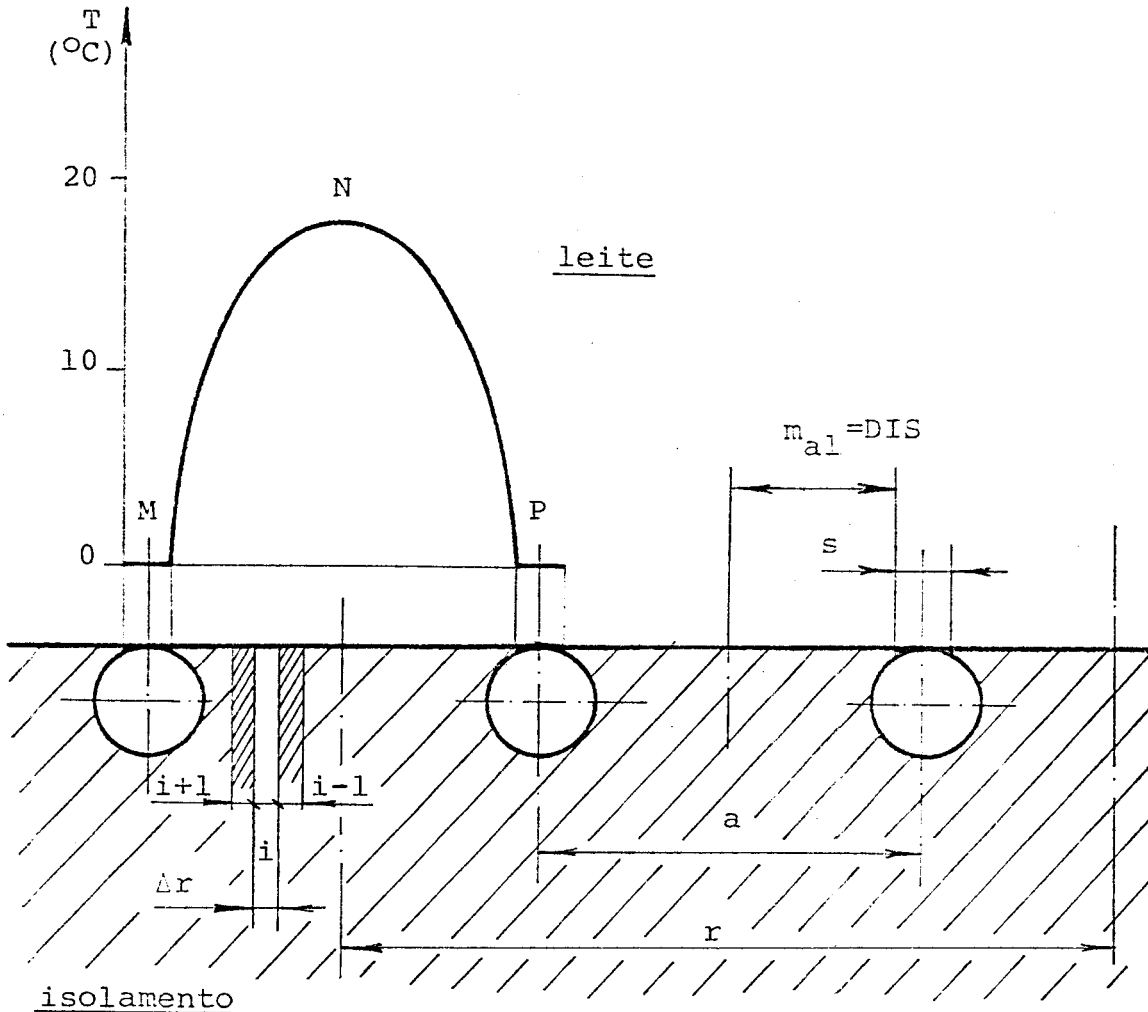


Fig. A.3.1 - Distribuição da temperatura do fundo do tanque.

Quanto ao item 1): depende da tecnologia aplicada, e da quantidade da massa condutora colocada. Nos cálculos feitos $s=0,6$ e 16 mm foram considerados.

Para o item 2): cálculos separados foram feitos para determinar o efeito da curvatura dos tubos.

Segundo a Fig. A.3.1. r é o raio, onde a "aleta" tem sua temperatura máxima entre os dois tubos.

Distribuindo-se a "aleta" em anéis de pequena largura Δr , o balanço de calor do anel nº (i) diz que

- o calor recebido do anel (i - 1) por condução,
- mais o calor recebido do leite por convecção
- deve ser igual ao calor perdido por condução para o anel (i + 1)

Nestas equações simples, recebemos do balanço, após arranjo

$$t_{i+1} = t_i - AB(t - t_i) - C(t_{i-1} - t_i) \quad (\text{A.3.1})$$

onde as constantes são:

$$A = \frac{r + (i - 0,5) \Delta r}{r + i \Delta r}$$

$$B = \Delta r^2 h / (\delta k)$$

$$C = \frac{r + (i - 1) \Delta r}{r + i \Delta r}$$

No cálculo para centro deve-se substituir $-\Delta r$ em vez de Δr nas constantes.

Admitindo a temperatura no raio r ($i = 1$), podemos calcular sucessivamente as temperaturas dos anéis que seguem.

Fazendo os cálculos em ambas as direções, para fora e para o centro, a distribuição da temperatura, e assim a temperatura média pode ser determinada por este método numérico.

Programando o método em uma calculadora HP-65, os dados e resultados principais foram, como segue, comparados com os tubos retos:

$$t = 20^{\circ}\text{C} \quad t_N = 17,895^{\circ}\text{C} \quad r = 0,25 \text{ m} \quad h = 670 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$$

	para fora	para dentro	tubos retos
Número dos anéis:	1713	1687	3400
t_t $^{\circ}\text{C}$	-0,042	0,035	0,052
t_{al} $^{\circ}\text{C}$	13,242	13,254	13,244

Os resultados mostram um desvio muito pequeno; podemos concluir que o cálculo com tubos retos é possível.

É interessante notar que a queda de temperatura na "aletta" é muito grande (entre 17,9 e -0°C), fato este que pode ter conseqüência:

- da má condutividade do aço inoxidável e
- do coeficiente de transferência de calor (h) relativamente grande entre leite e fundo.

Estes fatores aumentam o parâmetro X (eq.(2.16)), diminuem η (eq.(2.15)), provocando uma alta t_{a_1} (eq.(2.15)). A Fig. A.3.1 mostra, a distribuição de temperatura também, para o caso em questão.

Quanto ao item 3) o calor recebido pelo fundo através do isolamento é

$$\begin{aligned} \dot{q}_{tr} &= \left(\frac{1}{h_e} + (\delta/k)_{is} \right)^{-1} (t_a - \bar{t}_f) = \\ &= \left(\frac{1}{1/7 + 0,05/0,025} \right) (19,5 - 13,2) = 2,94 \text{ kcal/m}^2\text{h} \end{aligned}$$

e do leite:

$$\dot{q}_l = h(t - \bar{t}_f) = 670 (20 - 13,2) = 4556 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Realmente, o calor transmitido através do isolamento é

Finalmente, a temperatura média do fundo de tanque será

$$t_{f} = \frac{s t_t + 2 m_{al} t_{al}}{s + 2 m_{al}} \quad (\text{A.3.2})$$

Ao tubo extremo pertence uma largura de aleta

$$(m_{al} + m_p)$$

Substituindo esta expressão na eq. (2.16) calcula-se o parâmetro X' e da eq. (2.15), a temperatura média da parede. ($s/2$ sendo muito pequeno em relação ao $(m_{al} + m_p)$ o seu efeito é desprezado).

APÊNDICE 4

Coeficiente de transferência de calor (h) entre o "leite" agitado e a parede do tanque

Este h calcula-se segundo o item 2.4.1.

Como a temperatura do leite, e suas propriedades térmicas também variam bastante durante o processo, cálculos com $t = 4^{\circ}\text{C}$ e $t = 20^{\circ}\text{C}$ foram feitos, dando os seguintes resultados:

t ($^{\circ}\text{C}$)	Re	Pr	Nu	h (kcal/h m^2 $^{\circ}\text{C}$)
4	60,025	11,37	1241	616
20	93,379	7,00	1417	733

Pode-se ver que h varia também bastante com a temperatura do leite. Para considerar esta variação, pelo menos aproximadamente, de maneira simples, uma relação linear foi elaborada com os pares de valor (t, h) acima mencionados (como no método do Apêndice 5).

A relação determinada é

$$h = 586,75 + 7,313.t \quad (\text{A.4.1})$$

APÊNDICE 5Variação do efeito frigorífico (q_0)

O efeito frigorífico do refrigerante calcula-se como a diferença de entalpia após o evaporador (h_1) e antes da válvula de expansão (h_2)

$$q_0 = h_1 - h_2 \quad \text{kcal/kg}$$

Considerando, correspondentemente à temperatura do ambiente durante o experimento ($t_a = 19,5^\circ\text{C}$) uma temperatura de $t_2 \approx 30^\circ\text{C}$ antes da válvula de expansão, e desprezando o pequeno superaquecimento após o evaporador ($t_1 = t_0$), da tabela de vapor do refrigerante R-12 (8), recebemos os seguintes dados para a faixa de temperatura que nos interessa:

h_2 kcal/kg	t_0 $^\circ\text{C}$	h_1 kcal/kg	q_0 kcal/kg	Δq_0 %
108,18	-10	135,8	27,62	0
108,18	- 5	136,43	28,25	0,17
108,18	0	136,99	28,81	0,10
108,18	+ 5	137,54	29,36	0

A variação em função de t_0 é pequena, uma função linear será adequada, em forma de

$$q_0 = a + b t_0$$

Substituindo os valores t_0 e q_0 para

$$t_0 = -10 \quad \text{e} \quad t_0 = + 5$$

recebemos o seguinte sistema de equações:

$$27,62 = a + b(-10)$$

$$29,36 = a + b(5)$$

de onde $a = 28,78$

$$b = 0,116$$

Assim, a equação é

$$q_0 = 28,78 + 0,116 \cdot t_0 \quad \text{kcal/kg} \quad (\text{A.5.1})$$

q_0 na tabela anterior mostra o desvio entre o valor calculado da equação e o da tabela. (O desvio é muito pequeno).

APÊNDICE 6

Coefficiente de transferência de calor do refrigerante
em evaporação (h_i)

Aplicamos a eq. (2.8) do item 2.4.2. Verificamos a variação de h_i entre as nossas condições de operação.

Como a eq. (2.8) foi elaborada em unidades inglesas, aplicamos apenas neste Apêndice, estas unidades.

Sistema de expansão direta

Consideramos duas temperaturas de evaporação bastante extremas no processo: $t_o = 4,44 \text{ }^\circ\text{C} = 40^\circ\text{F}$ e $t_o = -6,67^\circ\text{C} = 20^\circ\text{F}$

a $t_o = 4,44^\circ\text{C}$

A capacidade frigorífica, da eq. (3.4) é:

$$\dot{Q}_o = 4218 \text{ kcal/h} = 16.740 \text{ Btu/h}$$

O efeito frigorífico do refrigerante da eq. (A.5.1) é

$$q_o = 29,29 \text{ kcal/kg} = 52,73 \text{ Btu/lb}$$

O fluxo da massa de refrigerante da eq. (3.7) é

$$\dot{m}_R = \dot{Q}_o/q_o = 16740/52,73 = 317,47 \text{ lb/h}$$

A velocidade mássica

$$G = \dot{m}_R/(d_i^2 \pi/4) = 317,47/((4,593 \cdot 10^{-2})^2 \pi/4) = 191 \text{ 611 lb/hft}^2$$

(O diâmetro interno do tubo de evaporador é

$$d_i = 14 \text{ mm} = 4,593 \cdot 10^{-2} \text{ ft})$$

A viscosidade dinâmica e a condutividade térmica do líquido de refrigerante (9):

$$\mu = 0,620 \text{ lb/ft h}$$

$$k = 0,0443 \text{ Btu/h ft F}$$

O comprimento do tubo de evaporador é da eq.(3.3.1)

$$L_t = 16,55 \text{ m} = 54,26 \text{ ft}$$

Com estes dados:

$$h_i = 0,0082 \frac{0,0443}{4,593 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{191,611 \cdot 4,593 \cdot 10^{-2}}{0,62} \right)^2 \cdot \left(\frac{778,16 \cdot 52,73}{54,26} \right)^{0,4} =$$

$$= 235 \text{ Btu/h ft}^2 \text{ F} = 1148 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

Cálculos semelhantes a $t_o = 6,67^\circ\text{C}$ deram os seguintes valores, comparando-os com os anteriores:

t_o	$^\circ\text{C}$	4,44	-6,67
\dot{Q}_o	Btu/h	16740	11291
q_o	Btu/lb	52,73	50,41
G	lb/h ft ²	191611	141225
μ	lb/ft h	0,620	0,687
k	Btu/h ft F	0,0443	0,0467
h_i	kcal/m ² h $^\circ\text{C}$	1148	858

Para simplificar foi elaborada uma relação linear, que é:

$$h_i = 1032 + 26,1 \cdot t_o \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \quad (\text{A.6.1})$$

Sistema de acumulação

Cálculos semelhantes aos anteriores, com $d_i = 11,12 \text{ mm}$ e $L_t = 40 \text{ m}$ (item 3.5.1) e com a unidade condensadora menor capacidade frigorífica da eq. (3.32) deram os seguintes resultados:

t_o	($^\circ\text{C}$)	4,44	-6,67
\dot{Q}_o	Btu/h	5658	3163
G	lb/h ft ²	102099	59701
h_i	kcal/m ² h $^\circ\text{C}$	588	372

A relação linear para h_{iac} :

$$h_{iac} = 501,7 + 19,44 \cdot t_o \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \quad (\text{A.6.2})$$

APÊNDICE 7

Iteração por aproximação gradual

Mostramos o método com exemplo da determinação da temperatura de evaporação (t_o).

A Fig. A.7.1 mostra, em função de t_o :

\dot{Q}_o capacidade frigorífica da unidade condensadora

kcal/h

\dot{Q}_{oe} fluxo de calor no evaporador

kcal/h

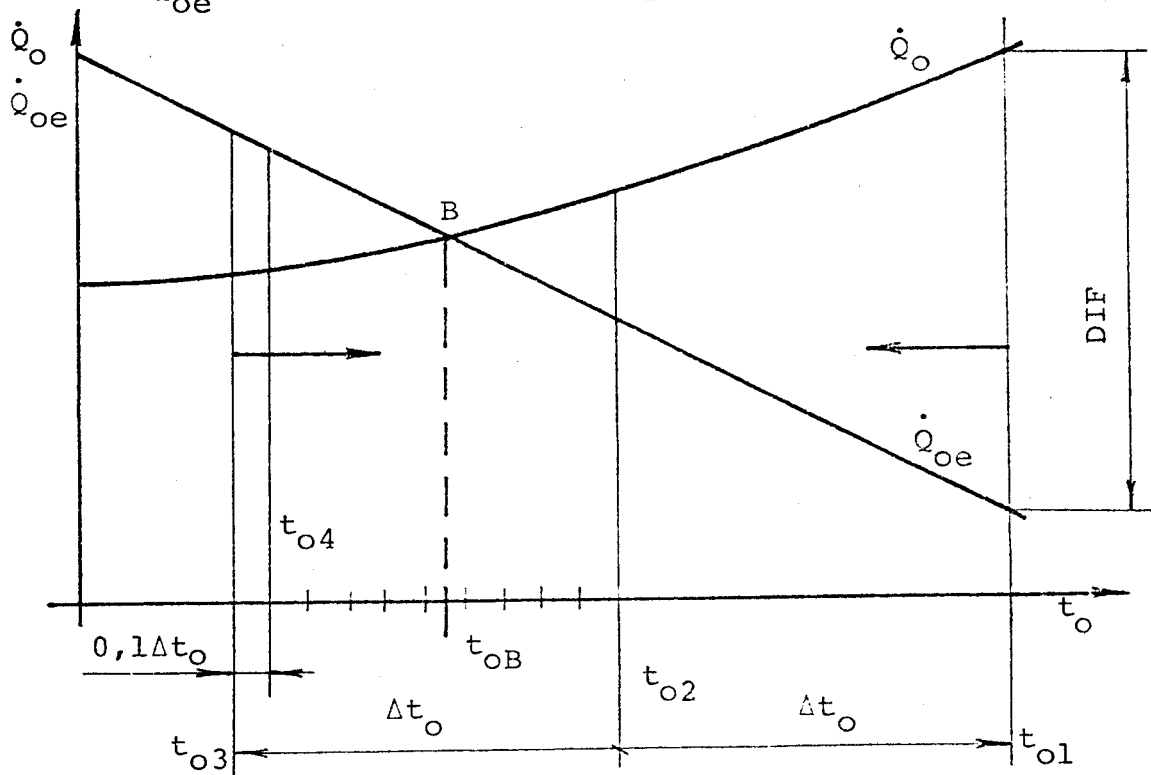


Fig. A.7.1 - Aproximação gradual.

O ponto de balanço é B; quando

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{oe} ,$$

a temperatura de evaporação que se estabelece, será

$$t_{oB}$$

A Fig. A.7.1 explica o método.

Começamos com o primeiro valor admitindo: t_{o1} o qual, na base de simples raciocínio é óbvio que fica acima do valor real. (Por exemplo: $t_o = 15^{\circ}\text{C}$)

Determinamos a diferença

$$\text{DIF} = Q_o - Q_{oe}$$

como é maior que a tolerância o cálculo admite:

$$t_{o2} = t_{o1} - \Delta t_o$$

Comparando com a diferença anterior

$$\text{DIFN} < \text{DIFA}, \text{ há convergência.}$$

A seguinte tentativa será:

$$t_{o3} = t_{o2} - \Delta t_o$$

Pode-se ver, que ultrapassando o resultado ($Q_o = Q_{oe}$), o sinal da diferença mudou. O resultado encontra-se entre t_{o2} e t_{o3} . Devemos continuar a iteração, mas em direção contrária e com pequenos passos uma vez chegamos perto do resultado.

O novo valor será por exemplo:

$$t_{o4} = t_{o3} + 0,1 \Delta t_o, \text{ e assim por diante.}$$

A condição da mudança no sinal da DIF é como segue:

$$|\text{DIFN} - \text{DIFA}| < |\text{DIFA}|$$

Se DIFN e DIFA tem os mesmos sinais, a desigualdade fica satisfeita.

Se os sinais são diferentes a desigualdade não será satisfeita.

Colocando na sequência de cálculo esta condição (IF) o computador coloca em vez de Δt_o o valor de $-0,1\Delta t_o$, e chega ao resultado através de relativamente poucas repetições de cálculo, mesmo admitindo-se que o primeiro valor está longe do resultado.

APÊNDICE 8

Coeficiente global de transferência de calor (U) entre o "leite" e a água na camisa do tanque do resfriador.

O leite está agitado, o coeficiente de transferência de calor (aqui h_{1ac}) entre ele e a superfície do tanque é tratado no Apêndice 4.

Através da parede (U_{pac})

No lado da água (da camisa) que não é agitada (convecção natural) o coeficiente de transferência de calor (h_{2ac}) calcula-se da eq. (2.7). Para grande ($Gr \cdot Pr$), o qual é o nosso caso:

$$Nu = \frac{h_2 L}{k} = 0,13 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (2.23)$$

onde o comprimento característico (L) é a altura da parede, com relação à do leite, e a temperatura de referência calcula-se

$$t_{fr} = \frac{t_A + t_{PA}}{2}$$

A altura do leite varia, mas não tem efeito sobre h_2 , porque Gr contém L^3 , e finalmente na equação temos L em ambos os lados. (Nos cálculos: $L = 0,35$ m).

Cálculos iterativos foram feitos entre condições extremas, onde a temperatura da parede (t_{PA}) foi determinada da igualdade dos calores transferidos.

$$h_{1ac}(t - t_{PA}) = h_{2ac}(t_{PA} - t_A) \quad (A.8.1)$$

desprezando a pequena queda de temperatura na parede do tanque.

Finalmente U_{pac} calcula-se da equação básica

$$1/U_{pac} = 1/h_{1ac} + \delta/k + 1/h_{2ac}$$

onde $\delta/k = 0,015/16 = 9,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/kcal}$ é a resistência de condução da parede.

Os resultados dos cálculos são:

t (°C)	t _A (°C)	h ₁ (kcal/m ² h°C)	(Gr.Pr) ₂	h ₂ (kcal/m ² h°C)	U _{pac} (kcal/m ² h°C)
20	0	733	2,102.10 ⁹	230	150
20	5	733	1,691.10 ⁹	219	146
4	0	616	3,488.10 ⁸	124	94

Podemos ver, que t_A tem pouco, mas t tem grande efeito sobre U_{pac}.

A equação linear (como no Apêndice 5) deu a seguinte equação:

$$U_{pac} = 80,5 + 3,38 t \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \quad (\text{A.8.2})$$

Através do fundo (U_{fac})

No lado da água na camisa vale a eq. (2.23):

$$Nu = 0,27 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

onde o comprimento característico é a dimensão horizontal, o diâmetro do tanque:

$$L = D_{ta} = 1 \text{ m}$$

Cálculos semelhantes ao caso da parede deram os seguintes resultados:

t (°C)	t _A (°C)	h ₁ (kcal/m ² h°C)	(Gr.Pr) ₂	h ₂ (kcal/m ² h°C)	U _{fac} (kcal/m ² h°C)
20	0	733	6,253.10 ¹⁰	66	60,2
20	5	733	4,913.10 ¹⁰	63	55,0
4	0	616	1,044.10 ¹⁰	41	38,3

Desprezando-se aqui também o efeito de t_A, a equação linear é

$$U_{fac} = 33,48 + 1,21 t \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \quad (\text{A.8.3})$$

APÊNDICE 9

Coefficiente de transferência de calor (h_{Ag}) entre água não agitada e tubo horizontal coberto por gelo.

Segundo eq. (2.23)

$$Nu = \frac{h D}{k} = 0,53 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

onde o comprimento característico é o diâmetro do gelo (D), e a temperatura de referência é

$$t_{fr} = \frac{t_A + t_s}{2} = \frac{t_A + 0}{2} \quad ^\circ C$$

Cálculos com $t_A = 1^\circ C$ e $t_A = 10^\circ C$

com $D = 0,02 \text{ m}$ e $D = 0,035 \text{ m}$

deram os seguintes resultados:

t_A ($^\circ C$)	D (m)	Gr	Pr	Nu	h_{Ag} (kcal/m ² h $^\circ C$)
1	0,02	1568	13,40	6,38	151
1	0,035	8405	13,40	9,71	131
10	0,02	2,108.10 ⁴	11,32	11,71	283
10	0,035	1,130.10 ⁵	11,32	17,82	246

A equação $h_{Ag} = f(t_A, D)$ foi elaborada em dois passos:

1) para $t_A = 1^\circ C$ uma relação linear deu (como no Apêndice 5)

$$h_{10} = 177,7 - 1333,3D \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ C \quad (\text{A.9.1})$$

e para $t_A = 10^\circ C$

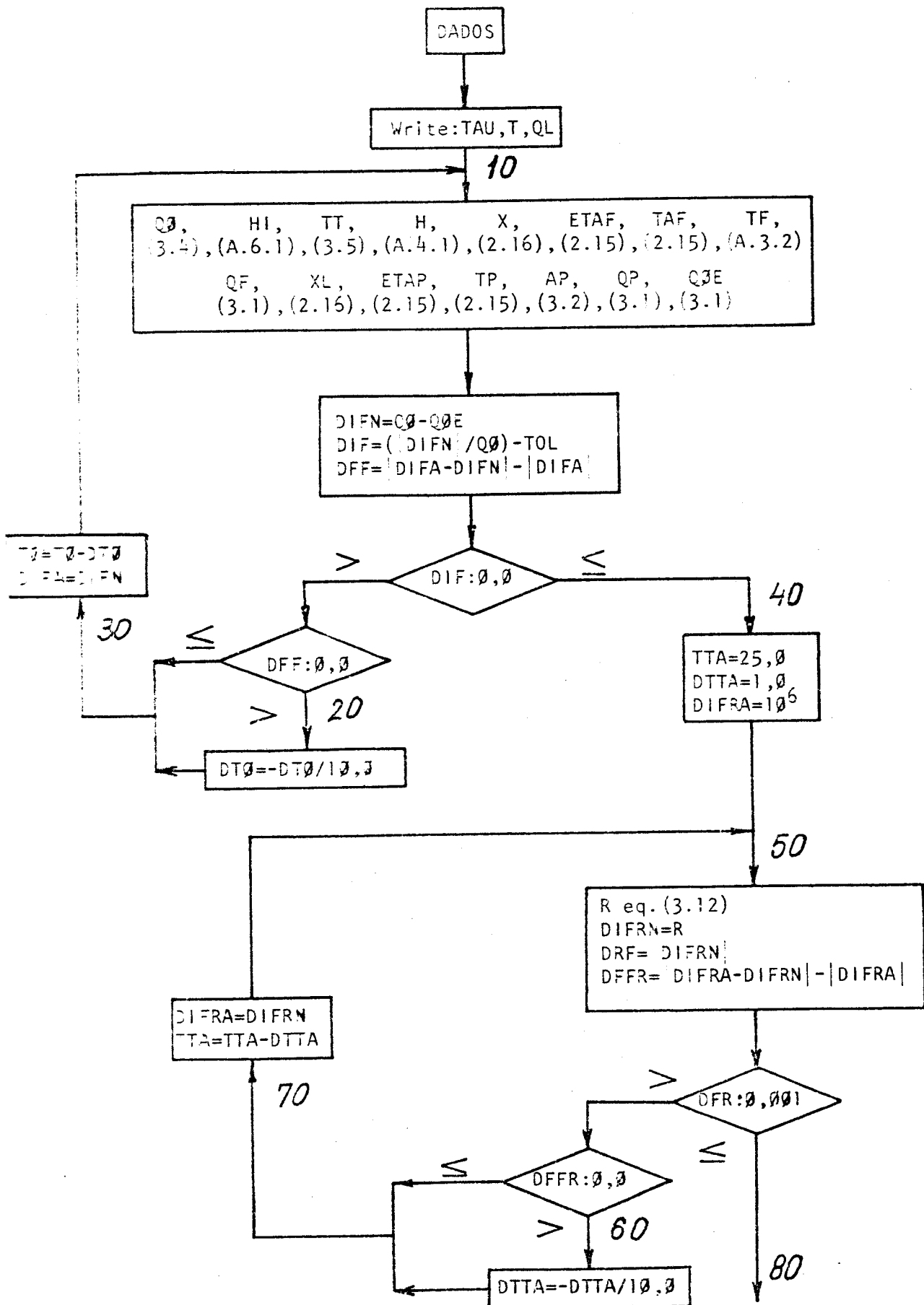
$$h_{10} = 332,3 - 2466,7D \quad \text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ C \quad (\text{A.9.2})$$

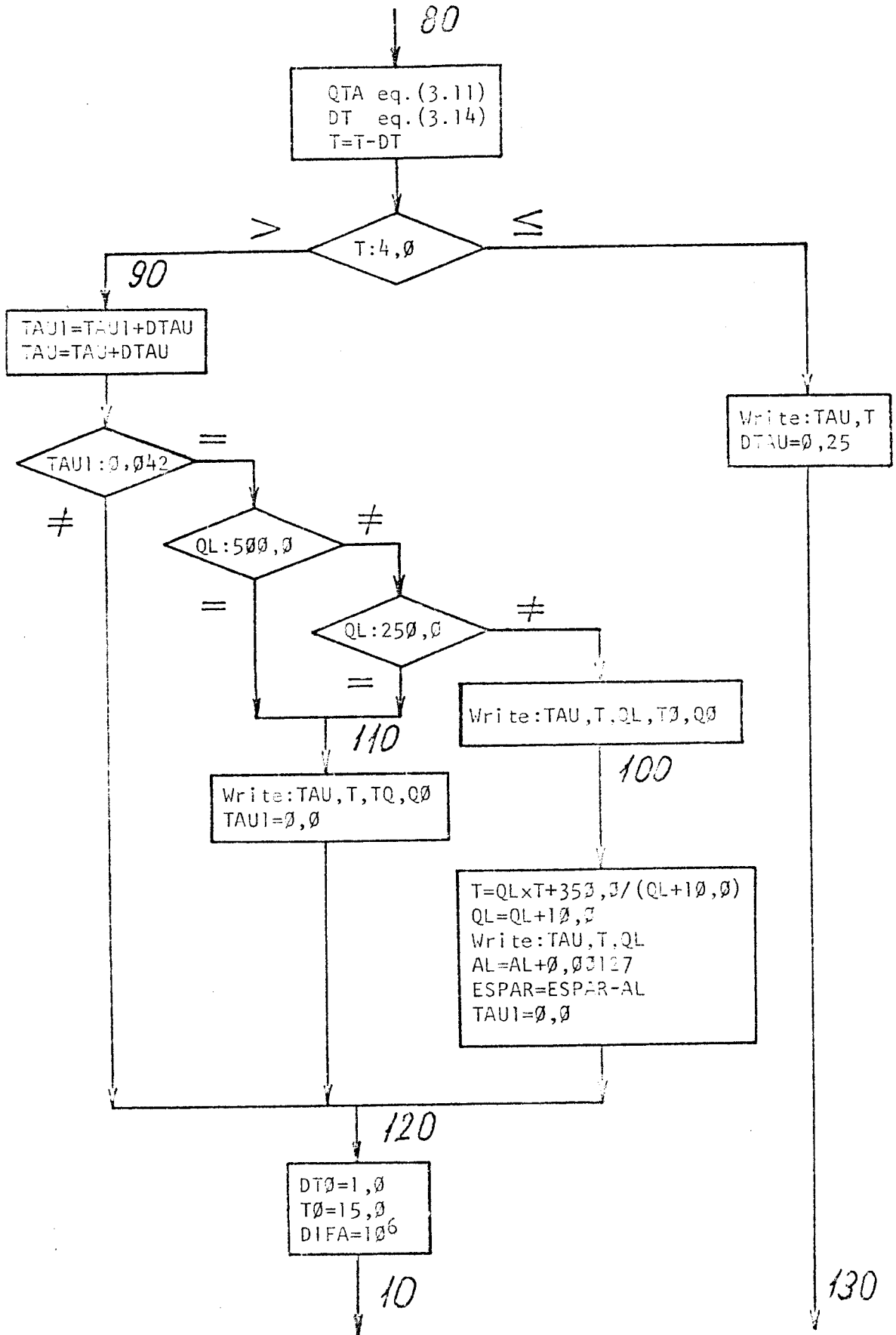
2) formando na mesma maneira uma relação linear com os pares

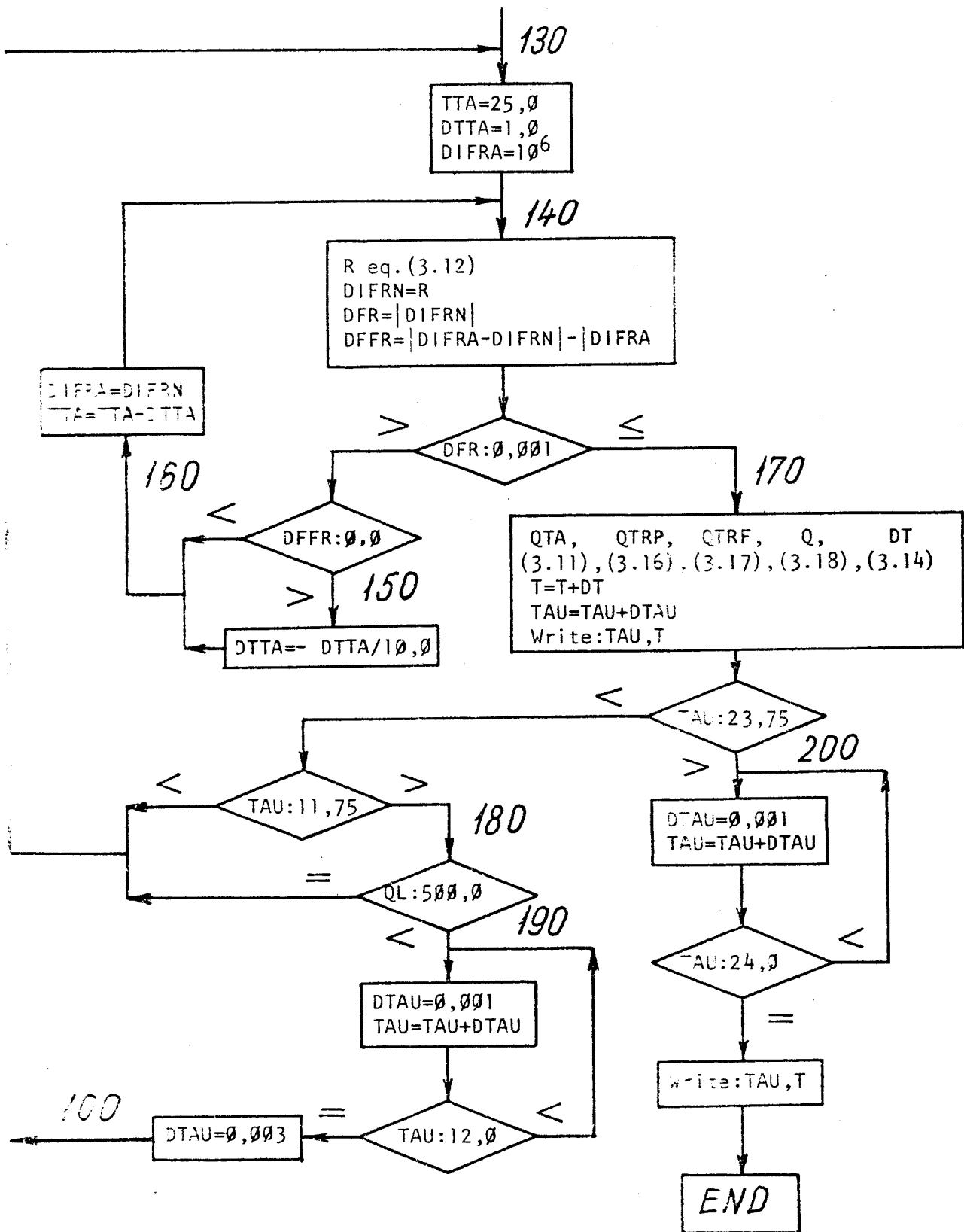
$$h_{10} \text{ e } 1^\circ C \quad \text{e} \quad h_{10} \text{ e } 10^\circ C$$

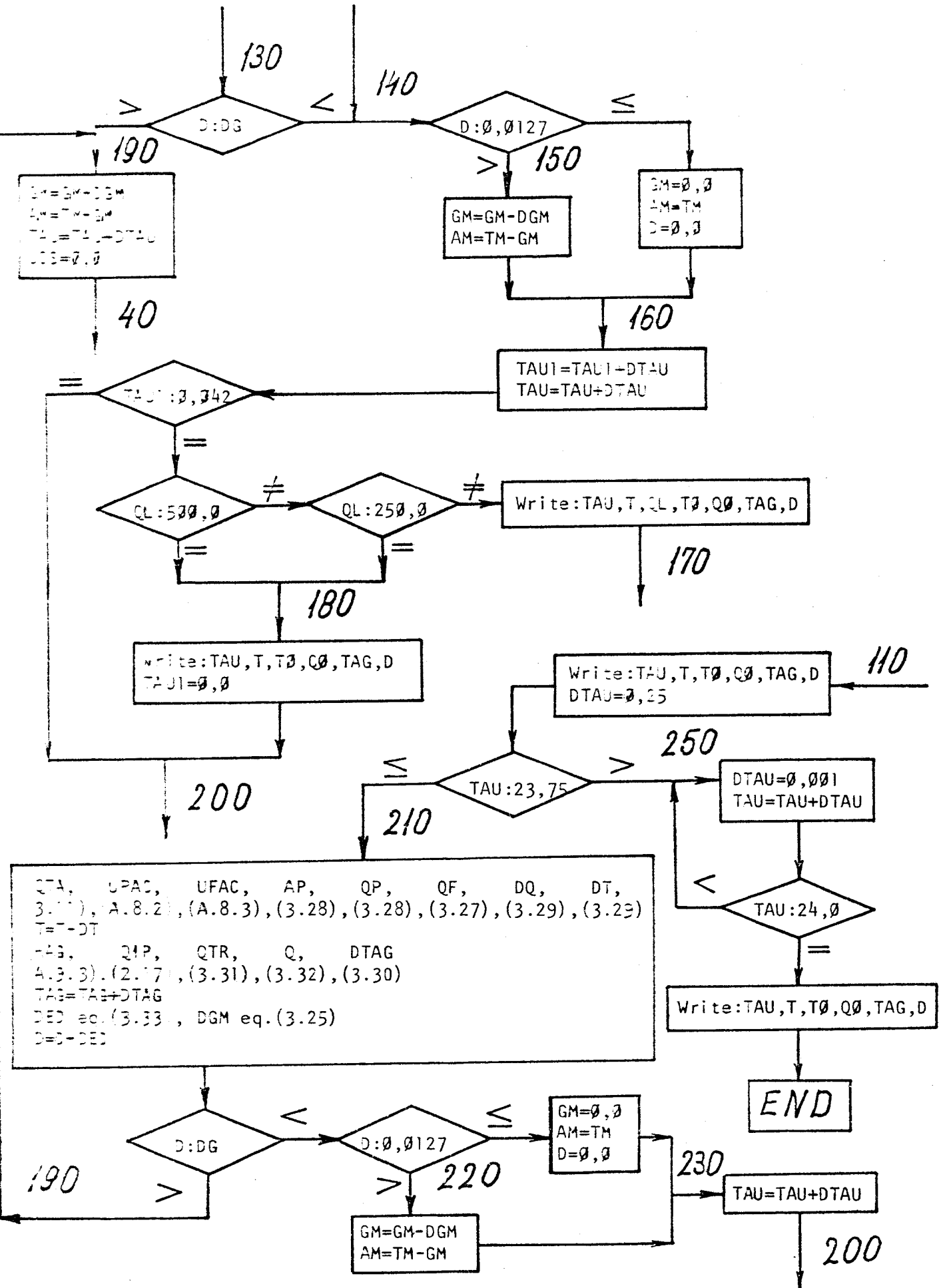
recebemos

FLUXOGRAMA (Expansão direta)









PROGRAMA DA SIMULAÇÃO EXPANSÃO DIRETA

LEITE F4

INTRODUÇÃO DOS DADOS

DATA HE, EEPIS, CONIS, CONAR/7. 0, 0. 05, 0. 03, 0. 022/
 DATA TAU, TAU1, DT0, COM, COND/0. 0, 0. 0. 1. 0. 16. 55, 16. 0/
 DATA ESP, DIS, TOL, DIFA/0. 0015, 0. 022, 1. 0E-03, 1. 0E+06/
 DATA DTAU, C, D, TA, QL/0. 003, 1. 0, 1. 0. 12. 5-10. 0/
 DATA TB, T, DI, RI/15. 0, 35. 0, 0. 014, 0. 729/
 DATA AF, AL, U, DTTA/0. 785, 0. 00127, 0. 552, 1. 0/
 DATA QAGI, ESPAR, S, DIFRA/3. 0, 0. 70773, 0. 006, 1. 0E+06/

SÍMBOLOS

TAU TEMPO /H/
 TAU1 INTERVALO DO TEMPO ENTRE DOIS DESPEJOS /H/
 DTAU INTERVALO DE TEMPO DURANTE O QUAL TODAS AS PROPRIEDADES
 SÃO CONSIDERADAS COMO CONSTANTES /H/
 DT0 VARIACAO NA TEMPERATURA DE EVAPORACAO /CELSIUS/
 TB TEMPERATURA DE EVAPORACAO /CELSIUS/
 T TEMPERATURA DO LEITE /CELSIUS/
 DT VARIACAO NA TEMPERATURA DO LEITE /CELSIUS/
 TA TEMPERATURA AMBIENTE /CELSIUS/
 TTA TEMPERATURA DA TAMPA DO TANQUE /CELSIUS/
 TAF TEMPERATURA DA ALETA DO FUNDO /CELSIUS/
 TF TEMPERATURA MEDIA DO FUNDO /CELSIUS/
 TP TEMPERATURA DA PAREDE DO TANQUE /CELSIUS/
 DTTA VARIACAO NA TEMPERATURA DA TAMPA /CELSIUS/
 TOL TOLERANCIA
 DIFA DIFERENCA ANTERIOR
 DIFN DIFERENCA POSTERIOR
 DIFRA DIFERENCA ANTERIOR
 DIFRN DIFERENCA POSTERIOR
 AL ALTURA DO LEITE NO TANQUE /M/
 AF SUPERFICIE DO FUNDO DO TANQUE /M2/
 AP SUPERFICIE DA PAREDE DO TANQUE /M2/
 RI SUPERFICIE INTERNA DO TUBO DE EVAPORADOR /M2/
 D DIAMETRO INTERNO DO TANQUE /M/
 DI DIAMETRO INTERNO DO TUBO DE EVAPORADOR /M/
 DIS LARGURA DA ALETA /M/
 ETAF EFICIENCIA DA ALETA NO FUNDO
 ETAP EFICIENCIA DA ALETA NA PAREDE
 X PARAMETRO PARA O CALCULO DA EFICIENCIA DA ALETA
 NO FUNDO
 YL PARAMETRO PARA O CALCULO DA EFICIENCIA DA ALETA
 NA PAREDE
 EEPIS ESPESSURA DO ISOLAMENTO /M/
 ESPAR ESPESSURA DO AR ACIMA DO LEITE NO TANQUE /M/
 ESP ESPESSURA DA PAREDE DO TANQUE /M/
 COM COMPRIMENTO DO TUBO DO EVAPORADOR /M/
 COND CONDUTIVIDADE TERMICA DO ACO INOXIDAVEL /KCAL/MHC/
 CONIS CONDUTIVIDADE TERMICA DO ISOLAMENTO /KCAL/MHC/
 CONAR CONDUTIVIDADE TERMICA DO AR /KCAL/MHC/
 HE COEFICIENTE DE PELICULA EXTERNA DO TANQUE
 /KCAL/M2HC/
 HI COEFICIENTE DE PELICULA NA EVAPORACAO DE FREON 12
 /KCAL/M2HC/
 H COEFICIENTE DE PELICULA ENTRE A PAREDE E O LEITE
 AGITADO /KCAL/M2HC/
 U COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR
 ATRAVES DO ISOLAMENTO DO TANQUE /KCAL/M2HC/

```

C      Q0      CAPACIDADE FRIGORIFICA EM FUNCAO DA TEMPERATURA
C      DE EVAPORACAO      /KCAL/H/
C      Q0E     CALOR RETIRADO PELO EVAPORADOR      /KCAL/H/
C      QF      CALOR TRANSFERIDO DO LEITE ATRAVES DO FUNDO
C              /KCAL/H/
C      QP      CALOR TRANSFERIDO DO LEITE ATRAVES DA PAREDE
C              /KCAL/H/
C      QAGI    CALOR FORNECIDO PELO AGITADOR      /KCAL/H/
C      QTA     CALOR TRANSFERIDO DO AMBIENTE ATRAVES DA TAMPA DO
C              TANQUE      /KCAL/H/
C      QTRF    CALOR TRANSFERIDO DO AMBIENTE PARA O LEITE      ATRAVES
C              DO FUNDO DO TANQUE      /KCAL/H//
C      QTRP    CALOR TRANSFERIDO DO AMBIENTE PARA O LEITE ATRAVES
C              DA PAREDE DO TANQUE      /KCAL/H/
C      S       LARGURA DO CONTATO DIRETO ENTRE O TUBO DE EVAPORADOR
C              E O FUNDO DO TANQUE      /M/
      WRITE(5,1)
1      FORMAT(2X,'TAU',7X,'T',11X,'QL',9X,'T0',9X,'Q0',/)
      WRITE(5,101)TAU,T,QL
101     FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.3/)
C      CALCULO DE T0 E Q0
10      Q0=1.106*(T0**2)+126.06*T0+3637.0
      HI=1032.0+26.1*T0
      TT=(Q0/(751.296+19.0*T0))+T0
      H=586.75+7.313*T
      X=SQRT(H/(COND*ESP))*DIS
      ETAF=(1.0/X)*(EXP(X)-EXP(-X))/(EXP(X)+EXP(-X))
      TAF=T-ETAF*(T-TT)
      TF=20.0*(5*TT+2*DIS*TAF)
      QF=AF*H*(T-TF)
      XL=SQRT(H/(COND*ESP))*(DIS+AL)
      ETAP=(1.0/XL)*((EXP(XL)-EXP(-XL))/(EXP(XL)+EXP(-XL)))
      TP=T-ETAP*(T-TT)
      AP=0.004*QL
      QP=AP*H*(T-TP)
      Q0E=QF+QP
      DIFN=Q0-Q0E
      DIF=(ABS(DIFN)/Q0)-TOL
      DFF=ABS(DIFA-DIFN)-ABS(DIFA)
      IF(DIF.LE.0.0) GO TO 40
      IF(DFF-0.0)30,30,20
20      DT0=-DT0/10.0
30      T0=T0-DT0
      DIFA=DIFN
      GO TO 10
C      CALCULO DE QTA
40      TTA=25.0
      DTTA=1.0
      DIFRA=1.0E+06
      R=0.59*(((TTA+273.15)/100.0)**4)+((CONAR/ESPAR)+HE)*
1      TTA-((CONAR/ESPAR)*T+0.59*(((T+273.15)/100.0)**4)+HE*TA)
      DIFRN=R
      DFR=ABS(DIFRA)
      DFFR=ABS(DIFRA-DIFRN)-ABS(DIFRA)
      IF(DFR.LE.0.001)GO TO 80
      IF(DFFR-0.0)70,70,60
60      DTTA=-DTTA/10.0
70      TTA=TTA-DTTA
      DIFRA=DIFRN
      GO TO 50
80      QTA=107.2-5.5*TTA
C      CALCULO DE T DURANTE OPERACAO
      DT=(Q0-QTA)*DTAU/(QL*C)
      T=T-DT
      IF(T.GT.4.0) GO TO 90

```

```

2      WRITE(5,2)TAU,T
      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3)
      DTAU=0.25
      GO TO 130
90     TAU1=TAU1+DTAU
      TAU=TAU+DTAU
      IF(TAU1.NE.0.042) GO TO 120
      IF(QL.EQ.500.0)GO TO 110
      IF(QL.EQ.250.0) GO TO 110
      WRITE(5,3)TAU,T,QL,T0,Q0
3      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.3,4X,F7.3,5X,F8.3)
100    T=(QL*T+350.0)/(QL+10.0)
C      PROXIMO DESPEJO
      QL=QL+10.0
      WRITE(5,4)TAU,T,QL
4      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.3/)
      AL=AL+0.00127
      ESPAR=ESPAR-AL
      TAU1=0.0
      GO TO 120
110    WRITE(5,5)TAU,T,T0,Q0
5      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3,16X,F7.3,5X,F8.3)
      TAU1=0.0
120    DIFRA=1.0E+06
      T0=15.0
      DT0=1.0
      GO TO 10
C      CALCULO DE QTA DURANTE A PARADA DO EQUIPAMENTO FRIGORIFICO
130    TTA=25.0
      DTTA=1.0
      DIFRA=1.0E+06
140    R=0.59*((((TTA+273.15)/100.0)**4)+((CONAR/ESPAR)+HE)*TTA-
1      ((CONAR/ESPAR)*T+0.59*((((T+273.15)/100.0)**4)+HE*TA)
      DIFRN=R
      DFR=ABS(DIFRN)
      DFFR=ABS(DIFRA-DIFRN)-ABS(DIFRA)
      IF(DFR.LE.0.001)GO TO 170
      IF(DFFR-0.0)160,160,150
150    DTTA=-DTTA/10.0
160    TTA=TTA-DTTA
      DIFRA=DIFRN
      GO TO 140
C      CALCULO DE T DURANTE A PARADA DO EQUIPAMENTO FRIGORIFICO
170    QTA=107.2-5.5*TTA
      QTRP=U*AP*(19.5-T)
      QTRF=8.45-0.4333*T
      Q=QTA+QTRP+QTRF+QAGI
      DT=Q*DTAU/QL*C
      T=T+DT
      TAU=TAU+DTAU
      WRITE(5,6)TAU,T
6      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3)
      IF(TAU.GT.23.75)GO TO 200
      IF(TAU.GT.11.75) GO TO 180
      GO TO 130
180    IF(QL.LT.500.0) GO TO 190
      GO TO 130
190    DTAU=0.001
      TAU=TAU+DTAU
      IF(TAU.LT.12.0) GO TO 190
C      COMECO DA SEGUNDA ORDENHA
      DTAU=0.003
      GO TO 100
200    DTAU=0.001
      TAU=TAU+DTAU
      IF(TAU.LT.24.0) GO TO 200
      WRITE(5,7)TAU,T
      FORMAT(1X,F6.3,5X,F6.3)

```

APÊNDICE 13

PROGRAMA DA ACUMULAÇÃO

ACFRIO. F4

C INTRODUCAO DOS DADOS
 DATA COM, AM, GM, DG, D/40. 0, 155. 63, 67. 37, 0. 05, 0. 05/
 DATA T0, T, CONAR, ESPAR, TA/-1. 0, 35. 0, 0. 022, 0. 70773, 19. 5/
 DATA TAU, TAU1, DT0, DE/0. 0, 0. 0, 1. 0, 0. 0127/
 DATA TOL, DIFA, AL, DTAU/1. 0E-03, 1. 0E+06, 0. 00127, 0. 003/
 DATA DI, TAG, AF, APA/0. 01112, 0. 1, 0. 785, 3. 24/
 DATA QAGI, HE, UAGA, QL/3. 0, 7. 0, 0. 55, 10. 0/
 DATA TM, QG, ROG, PI/223. 0, 79. 5, 917. 0, 3. 14/
 C SIMBOLOS
 C TAU TEMPO /H/
 C TAU1 INTERVALO DE TEMPO ENTRE DOIS DESPEJOS /H/
 C DTAU INTERVALO DE TEMPO DURANTE O QUAL TODAS AS PROPRIEDADES
 C SAO CONSIDERADAS COMO CONSTANTES /H/
 C DT0 VARIACAO DA TEMPERATURA DE EVAPORACAO /CELSIUS/
 C T0 TEMPERATURA DE EVAPORACAO /CELSIUS/
 C T TEMPERATURA DO LEITE /CELSIUS/
 C DT VARIACAO DA TEMPERATURA DO LEITE /CELSIUS/
 C TA TEMPERATURA AMBIENTE /CELSIUS/
 C TAG TEMPERATURA DA AGUA DO RESFRIAMENTO /CELSIUS/
 C DTAG VARIACAO DA TEMPERATURA DA AGUA DE RESFRIAMENTO
 C /CELSIUS/
 C TM MASSA TOTAL DE AGUA E GELO NA CAMISA DO TANQUE
 C /KG/
 C TTA TEMPERATURA DA TAMPA DO TANQUE /CELSIUS/
 C DTTA VARIACAO DA TEMPERATURA DA TAMPA /CELSIUS/
 C TOL TOLERANCIA
 C DIFA DIFERENCA ANTERIOR
 C DIFN DIFERENCA POSTERIOR
 C DIFRA DIFERENCA ANTERIOR
 C DIFRN DIFERENCA POSTERIOR
 C AL ALTURA DO LEITE NO TANQUE /M/
 C AF SUPERFICIE DO FUNDO DO TANQUE /M2/
 C AP SUPERFICIE DA PAREDE DO TANQUE /M2/
 C APA SUPERFICIE DA PAREDE DO TANQUE ATE A ALTURA DA
 C AGUA NA CAMISA /M2/
 C AM MASSA DA AGUA DE RESFRIAMENTO /KG/
 C GM MASSA DO GELO /KG/
 C D DIAMETRO DO GELO /M/
 C DED VARIACAO DO DIAMETRO DO GELO /M/
 C DG DIAMETRO MAXIMO DO GELO /M/
 C DGM VARIACAO DA MASSA DO GELO /KG/
 C DI DIAMETRO INTERNO DO TUBO DE EVAPORADOR /M/
 C DE DIAMETRO EXTERNO DO TUBO DE EVAPORADOR /M/
 C ESPAR ESPESSURA DE AR ACIMA DO LEITE NO TANQUE /M/
 C CONAR CONDUTIVIDADE TERMICA DO AR /KCAL/MHC/
 C COM COMPRIMENTO DO TUBO DE EVAPORADOR /M/
 C HE COEFICIENTE DE PELICULA EXTERNA DO TANQUE
 C /KCAL/M2HC/
 C HIAC COEFICIENTE DE PELICULA NA EVAPORACAO DE FREON 12
 C /KCAL/M2HC/
 C HAG COEFICIENTE DA PELICULA ENTRE O GELO E A AGUA DE
 C RESFRIAMENTO /KCAL/M2HC/
 C UAGA COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR
 C ATRAVES DO ISOLAMENTO DO TANQUE /KCAL/M2HC/
 C UCS COEFICIENTE DE TRANSMISSAO DE CALOR ENTRE SUPERFICIE
 C DE GELO E REFRIGERANTE /KCAL/M2HC/
 C UFAC COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR
 C ATRAVES DO FUNDO DO TANQUE /KCAL/M2HC/
 C UPAC COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR
 C ATRAVES DA PAREDE DO TANQUE /KCAL/M2HC/


```

C      QAGI   CALOR FORNECIDO PELO AGITADOR   /KCAL/H/
C      QL     QUANTIDADE DE LEITE NO TANQUE   /L/
C      Q      CALOR RECEBIDO PELA AGUA DE RESFRIAMENTO /KCAL/H/
C      Q0     CAPACIDADE FRIGORIFICA EM FUNCAO DA TEMPERATURA
C            DE EVAPORACAO   /KCAL/H/
C      Q2P    CALOR RETIRADO PELO REFRIGERANTE POR 1 METRO DE
C            COMPRIMENTO DE TUBO   /KCAL/HM/
C      Q1P    CALOR TRANSFERIDO DA AGUA AO GELO POR 1 METRO DE
C            COMPRIMENTO   /KCAL/HM/
C      Q0E    CALOR RETIRADO PELO REFRIGERANTE   /KCAL/H/
C      QF     CALOR TRANSFERIDO DO LEITE PARA A AGUA DE RESFRIAMENTO
C            ATRAVES DO FUNDO   /KCAL/H/
C      QP     CALOR TRANSFERIDO DO LEITE PARA A AGUA DE
C            RESFRIAMENTO ATRAVES DA PAREDE   /KCAL/H/
C      QTR    CALOR TRANSFERIDO DO AMBIENTE PARA A AGUA DE
C            RESFRIAMENTO   /KCAL/H
C      QTA    CALOR TRANSFERIDO DO AMBIENTE ATRAVES DA TAMPA DO
C            TANQUE   /KCAL/H/

      WRITE(5,1)
1      FORMAT(2X,'TAU',5X,'T',9X,'QL',5X,'T0',7X,'Q0',8X,'TAG',
      15X,'D',/)
      WRITE(5,2)TAU,T,QL,TAG,D
2      FORMAT(1X,F6.3,3X,F6.3,3X,F5.1,22X,F5.3,3X,F6.4/)
C      CALCULO DE T0 E Q0
10     Q0=1.335*(T0**2)+59.55*T0+1135.0
      HIAC=501.7+19.44*T0
      UCS=1/(0.08376*(ALOG(78.74*D))+0.00007+(1/(17.526+
1     +0.68*T0)))
      Q2P=UCS*(-T0)
      Q0E=Q2P*COM
      DIFN=Q0-Q0E
      DIF=(ABS(DIFN)/Q0)-TOL
      DFF=ABS(DIFN-DIFA)-ABS(DIFA)
      IF(DIF.LE.0.0)GO TO 40
      IF(DFF-0.0)30,30,20
20     DT0=-DT0/10.0
30     T0=T0-DT0
      DIFA=DIFN
      GO TO 10
C      CALCULO DE QTA
40     TTA=25.0
      DTTA=1.0
      DIFRA=1.0E+06
50     R=0.59*(((TTA+273.15)/100.0)**4)+((CONAR/ESPAR)+HE)*TTA-
2     ((CONAR/ESPAR)*T+0.59*(((T+273.15)/100.0)**4)+HE*TA)
      DIFRN=R
      DFR=ABS(DIFRN)
      DFFR=ABS(DIFRA-DIFRN)-ABS(DIFRA)
      IF(DFR.LE.0.001)GO TO 80
      IF(DFFR-0.0)70,70,60
60     DTTA=-DTTA/10.0
70     TTA=TTA-DTTA
      DIFRA=DIFRN
      GO TO 50
80     IF(QL.EQ.500.0)GO TO 100
      IF(QL.GT.250.0)GO TO 120
      IF(TAU.GT.11.75)GO TO 240
      IF(T-4.0)90,90,120
90     WRITE(5,3)TAU,T,T0,Q0,TAG,D
3     FORMAT(1X,F6.3,3X,F6.3,11X,F6.3,3X,F7.2,3X,F5.3,3X,F6.4)
      DTAU=0.25
      IF(QL.NE.250.0)GO TO 120
      IF(D.GT.DG)GO TO 210
      GO TO 120
100    IF(T.LE.4.0)GO TO 110

```

```

110 WRITE(5,4)TAU, T, T0, Q0, TAG, D
4   FORMAT(1X, F6. 3, 3X, F6. 3, 11X, F6. 3, 3X, F7. 2, 3X, F5. 3, 3X, F6. 4)
C   AUMENTOU DTAU PARA PROCESSO LENTO
    DTAU=0. 25
    IF(TAU-23. 75)210, 210, 250
120 QTA=107. 2-5. 5*TTA
C   CALCULO DE T
    UPAC=80. 5+3. 38*T
    UFAC=33. 48+1. 21*T
    AP=0. 004*QL
    QP=AP*UPAC*(T-TAG)
    QF=AF*UFAC*(T-TAG)
    DQ=QP+QF-QTA-QAGI
    DT=(DQ*DTAU)/QL
    T=T-DT
C   CALCULO DE TAG
    HAG=160. 48-1207. 41*D+17. 19*TAG-125. 93*D*TAG
    Q1P=PI*D*HAG*TAG
    QTR=APA*UAGA*(TA-TAG)
    Q=QP+QF+QTR
    DTAG=(Q-Q1P*COM)*DTAU/AM
    TAG=TAG+DTAG
C   CALCULO DE D
    DED=(2*(D*HAG*TAG-UCS*(-T0)/PI)/(D*ROG*QG))*DTAU
    DGM=D*PI*(DED/2. 0)*COM*ROG
    D=D-DED
    IF(QL-250. 0)140, 130, 140
130 IF(D. GT. DG) GO TO 190
140 IF(D. GT. 0. 0127) GO TO 150
    GM=0. 0
    AM=TM
    D=0. 0
    GO TO 160
150 GM=GM-DGM
    AM=TM-GM
160 TAU1=TAU1+DTAU
    TAU=TAU+DTAU
    IF(TAU1. NE. 0. 042) GO TO 200
    IF(QL. EQ. 500. 0)GO TO 180
    IF(QL. EQ. 250. 0)GO TO 180
    WRITE(5,5)TAU, T, QL, T0, Q0, TAG, D
5   FORMAT(1X, F6. 3, 3X, F6. 3, 3X, F5. 1, 3X, F6. 3, 3X, F7. 2, 3X, F5. 3, 3X, F6. 4)
170 T=(QL*T+350. 0)/(QL+10. 0)
C   PROXIMO DESPEJO
    QL=QL+10. 0
    WRITE(5,6)TAU, T, QL
6   FORMAT(1X, F6. 3, 3X, F6. 3, 3X, F5. 1/)
    AL=AL+0. 00127
    ESPAR=ESPAR-AL
    TAU1=0. 0
    GO TO 200
180 WRITE(5,7)TAU, T, T0, Q0, TAG, D
7   FORMAT(1X, F6. 3, 3X, F6. 3, 11X, F6. 3, 3X, F7. 2, 3X, F5. 3, 3X, F6. 4)
    TAU1=0. 0
    GO TO 200
190 GM=GM-DGM
    AM=TM-GM
    TAU=TAU+DTAU
    UCS=0. 0
C   PAROU O EQUIPAMENTO FRIGORIFICO
    GO TO 40
200 DIFA=1. 0E+06
    T0=-1. 0
    DT0=1. 0
    GO TO 10
210 QTA=107. 2-5. 5*TTA

```

```

C      CALCULO DE T QUANDO QL IGUAL A 500.0 LITROS
      UPAC=80.5+3.38*T
      UFAC=33.48+1.21*T
      AP=0.004*QL
      QP=AP*UPAC*(T-TAG)
      QF=AF*UFAC*(T-TAG)
      DQ=QP+QF-QTA-QAGI
      DT=(DQ*DTAU)/QL
      T=T-DT

C      CALCULO DE TAG QUANDO QL IGUAL A 500.0 LITROS
      HAG=160.48-1207.41*D+17.19*TAG-125.93*D*TAG
      Q1P=PI*D*HAG*TAG
      QTR=APA*UAGA*(TA-TAG)
      Q=QP+QF+QTR
      DTAG=(Q-Q1P*COM)*DTAU/AM
      TAG=TAG+DTAG

C      CALCULO DE D QUANDO QL IGUAL A 500.0 LITROS
      DED=(2*(D*HAG*TAG-UCS*(-T0)/PI)/(D*ROG*QG))*DTAU
      DGM=D*PI*(DED/2.0)*COM*ROG
      D=D-DED
      IF(D.GT.DG) GO TO 190
      IF(D.GT.0.0127) GO TO 220
      GM=0.0
      AM=TM
      D=0.0
      GO TO 230
220    GM=GM-DGM
      AM=TM-GM
230    TAU=TAU+DTAU
      GO TO 200
240    DTAU=0.001
      TAU=TAU+DTAU
      IF(TAU.LT.12.0) GO TO 240
C      COMECO DA SEGUNDA ORDENHA
      WRITE(5,8)TAU, T, T0, Q0, TAG, D
8      FORMAT(1X, F6.3, 3X, F6.3, 11X, F6.3, 3X, F7.2, 3X, F5.3, 3X, F6.4)
      DTAU=0.003
      GO TO 170
250    DTAU=0.001
      TAU=TAU+DTAU
      IF(TAU.LT.24.0) GO TO 250
      WRITE(5,9)TAU, T, T0, Q0, TAG, D
9      FORMAT(1X, F6.3, 3X, F6.3, 11X, F6.3, 3X, F7.2, 3X, F5.3, 3X, F6.4)
      CALL EXIT
      END
EX

```

Tabela A.1- Resultados experimentais

τ (h, min)	t (°C)	Q_l (litros)	P_o (psig)	P_{oc} (psig)	t_o (°C)
10	35	10			
0	35	10			
2,5	20	10	1	0,51	-32,2
2,5	25	20	11	9,47	-18,46
5,0	18	30	27	25,5	- 3,9
7,5	24	40	33	30,6	- 0,26
10	23	50	34	31,76	0,53
12,5	21	60	36	34,1	2,06
15	20	70	36	34,1	2,06
17,5	20	80	36	34,1	2,06
20	20	90	36	34,1	2,06
22,5	20	100	37	35,1	2,7
25	20	110	37	35,1	2,7
27,5	20	120	37	35,1	2,7
30	20	130	37	35,1	2,7
32,5	20	140	37	35,1	2,7
35	20	150	36	34,1	2,06
37,5	20	160	36	34,1	2,06
40	20	170	36	34,1	2,06
42,5	20	180	35,9	33,98	2
45	20	190	35,9	33,98	2
47,5	20	200	35,9	33,98	2
50	20	210	35,9	33,98	2
52,5	20	220	35,9	33,98	2
55	20	230	35,9	33,98	2
57,5	20	240	35,9	33,98	2
60	20	250	35,9	33,98	2
11	18		35	33	1,3
15	18		35	33	1,3
30	14,8		31,5	29,4	- 1,07
45	11,5		27,5	26	- 3,57
12	8		25	23,6	- 5,37
15	6		22,5	21,0	- 7,40
30	4		20	18,5	- 9,54
45	4		19	17,5	-10,4

Continuação da Tabela A.1.

τ (h, min)	t (°C)	P_o (psig)
13 15 30 45	4 4 4 4	-5 0 2 4
14 15 30 45	4 4 4 4	3,9 3 3,1 3,1
15 15 30 45	4 4 4 4	3,1 5 5 5
16 15 30 45	4,1 4,1 4,2 4,2	5 5 5 5
17 15 30 45	4,3 4,4 4,6 4,6	5 5 5 5
18 15 30 45	4,5 4,5 4,5	5,5 5 5
19 15 30 45	4,5 4,5 4,5 4,5	9 12 16 15
20 15 30 45	4,7 4,6 4,6 4,6	-12 -9 -5 -1
21 15 30 45	4,5 4,5 4,2 4,2	1 3 5 9
22	4,5	-13

Tabela A.2 - Resultados experimentais

τ (h, min)	t (°C)	Q_l (litros)	P_o (psig)	P_{oc} (psig)	t_o (°C)
22 0	4,5	260	- 7	-3,43	-40,5
2,5	5	270	- 2	-0,98	-35,5
5	6	280	28	26,4	- 3,2
7,5	7	290	20	18,5	- 9,5
10	7,5	300	20	18,5	- 9,5
12,5	8	310	21	19,5	- 8,7
15	8,5	320	21	19,5	- 8,7
17,5	9	330	23	21,6	- 7
20	9	340	23	21,6	- 7
22,5	9,5	350	23	21,6	- 7
25	9,5	360	23	21,6	- 7
27,5	10	370	23	21,6	- 7
30	11	380	24	22,65	- 6,1
32,5	11,5	390	24	22,65	- 6,1
35	12	400	24	22,65	- 6,1
37,5	12	410	24	22,65	- 6,1
40	12	420	25	23,6	- 5,36
42,5	12,5	430	25	23,6	- 5,36
45	12,5	440	25,5	24,07	- 5
47,5	13	450	25,5	24,07	- 5
50	13	460	25,5	24,07	- 5
52,5	13	470	26	24,55	- 4,63
55	13	480	26	24,55	- 4,63
57,5	13	490	27	25,5	- 3,9
60	13	500	27	25,5	- 3,9
23 15	12		27	25,5	- 3,9
30	11		26	24,55	- 4,63
45	8		24	22,65	- 6,1
24	7		23	21,6	- 6,96
15	6		22	20,55	- 7,82
30	5		21	19,5	- 8,7
45	4		20	18,5	- 9,5
1	4		19	17,5	-10,4

Continuação da Tabela A.2.

τ (h, min)	t (°C)	P_o (psig)
15 30 45	4 4,2 4,3	-13 -12 -12
2 15 30 45	4,5 4,5 4,5 4,5	-12 -12 -12 -12
3 15 30 45	4,6 4,6 4,6 4,6	-12 -12 -12 - 8
4 15 30 45	4,6 4,6 4,7 4,7	- 5 - 5 - 2 0
5 15 30 45	4,7 4,7 4,7 4,7	2 2 2 5
6 15 30 45	4,7 4,8 4,8 4,8	8 9 10 10
7 15 30 45	4,8 4,8 4,9 4,9	11 12 11 11
8 15 30 45	5,0 5,0 5,0 5,0	11 11 11 11
9 15 30 45	5,0 4,9 4,9 4,8	11 11 11 11
10	4,8	11

Tabela A.3 - 0 efeito do contato entre tubo e fundo (DIS) e da capacidade frigorífica (\dot{Q}_0) sobre a simulação (expansão direta)

\dot{Q}_0 (%)	DIS (m)	Q ₀ =250 (litros)		t=10 (oc)		t=4 (oc)		$\tau=12$ (h)	Q ₀ =500 (litros)		t=10 (oc)		t=4 (oc)		$\tau=24$ (h)
		t (oc)	t ₀ (oc)	τ (h)	t ₀ (oc)	τ (h)	t ₀ (oc)		t (oc)	τ (h)	t ₀ (oc)	t (oc)	τ (h)	t ₀ (oc)	
100	0,017	18,6	2,9	1,6	-3,6	2,1	-7,9	4,9	13,3	-0,8	13,5	-3,1	14,5	-7,7	4,6
	0,025	21,2	-1,1	1,9	-8,2	2,5	-12,2	4,9	14,2	-4,7	13,7	-7,4	14,9	-11,5	4,6
	0,022	19,9	0,9	1,8	-5,9	2,3	-9,9	4,9	13,8	-2,8	13,6	-5,4	14,7	-9,7	4,6
95	0,022	20,2	1,8	1,8	-5,3	2,3	-9,6	4,9	14,0	-2,1	13,7	-4,8	14,8	-9,7	4,6
	0,023	20,6	1,2	1,8	-6,0	2,4	-10,0	4,9	14,1	-2,6	13,7	-5,4	14,8	-9,7	4,6
90	0,022	20,6	2,7	1,8	-4,7	2,4	-9,2	4,9	14,2	-4,2	14,8	-4,2	14,8	-8,7	4,6

Tabela A.4 - Dados característicos calculados (Acumulação) $\dot{Q}_o = 100\%$.

Diâmetro do gelo D_2 (m)	Comprimento do tubo do evaporador L_t (m)	$Q_0=250$ (litros)		$t=10$ (°C)		$t=4$ (°C)		$t=12$ (h)		$Q_0=500$ (litros)		$t=10$ (°C)		$t=4$ (°C)		$t=24$ (h)	
		t (°C)	D (m)	τ (h)	D (m)	τ (h)	D (m)	τ (h)	t (°C)	D (m)	τ (°C)	D (m)	τ (h)	D (m)	τ (h)	t (°C)	D (m)
0,04	40	23,303	0,0328	2,688	0,0149	5,295	0,0219	0,487	0,0406	14,155	0,0390	13,890	0,0307	16,857	0,0263	0,596	0,0399
	51,43	23,143	0,0337	2,562	0,0207	4,818	0,0240	0,383	0,0402	14,052	0,0385	13,806	0,0323	16,518	0,0283	0,484	0,0403
	60	23,049	0,0342	2,478	0,0238	4,629	0,0259	0,339	0,0407	13,993	0,0391	13,764	0,0339	16,344	0,0304	0,417	0,0407
0,045	40	23,266	0,0381	2,646	0,0226	4,989	0,0263	0,416	0,0452	14,126	0,0435	13,890	0,0359	16,704	0,0314	0,537	0,0453
	51,43	23,106	0,0390	2,520	0,0281	4,653	0,0300	0,350	0,0457	14,032	0,0440	13,806	0,0384	16,401	0,0347	0,435	0,0458
	60	23,013	0,0396	2,436	0,0308	4,515	0,0322	0,329	0,0457	13,981	0,0440	13,764	0,0394	16,263	0,0362	0,402	0,0450
0,05	40	23,24	0,0434	2,562	0,0302	4,815	0,0322	0,403	0,0507	14,119	0,0489	13,848	0,0423	16,587	0,0377	0,516	0,0507
	51,43	23,081	0,0443	2,478	0,0350	4,560	0,0363	0,341	0,0507	14,026	0,0489	13,806	0,0439	16,332	0,0406	0,421	0,0502
	60	22,988	0,0449	2,436	0,0373	4,449	0,0384	0,305	0,0501	13,97	0,0484	13,764	0,0441	16,212	0,0413	0,366	0,0505

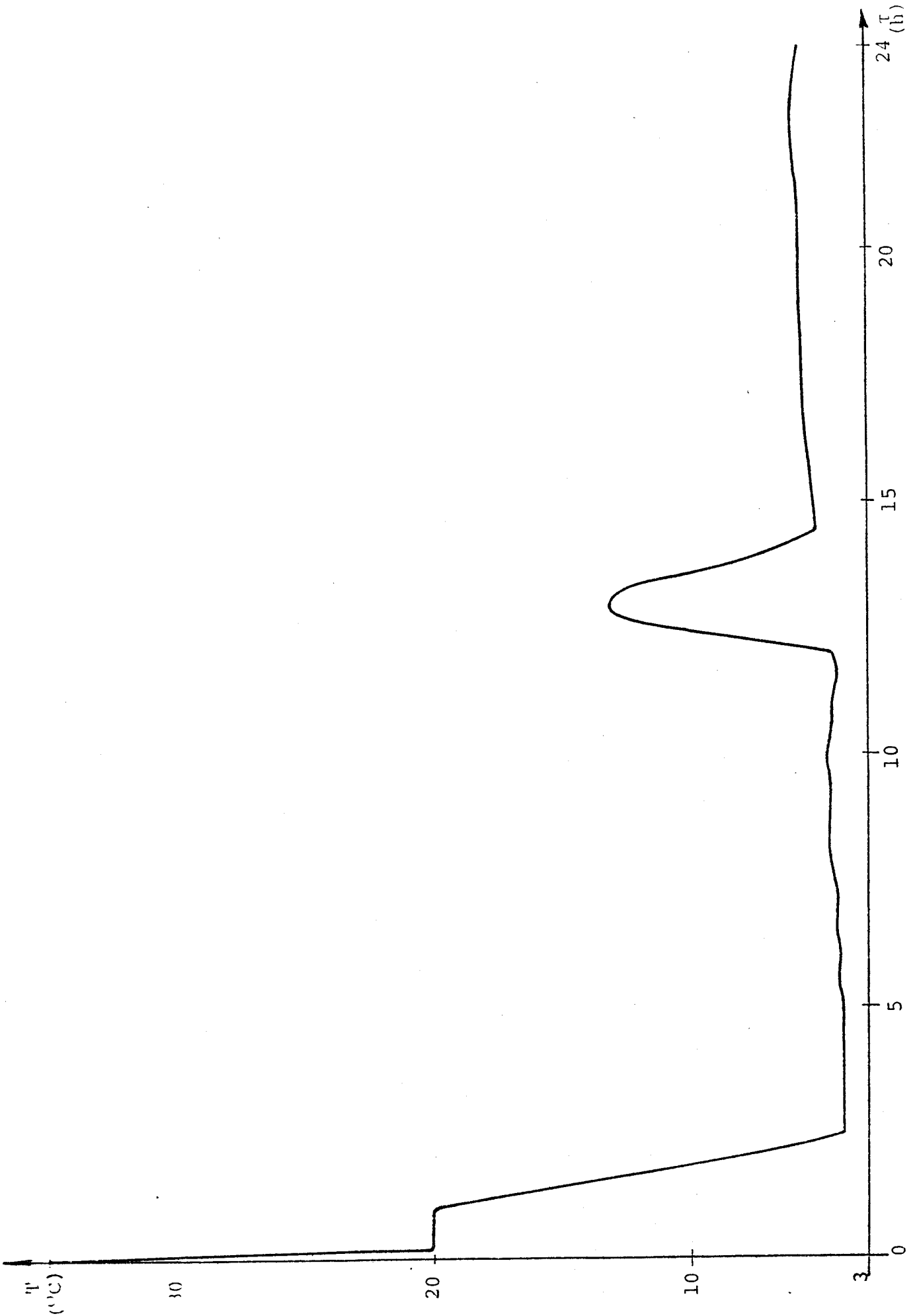


Fig. A.1 Variação da temperatura do "leite" durante 24 horas.

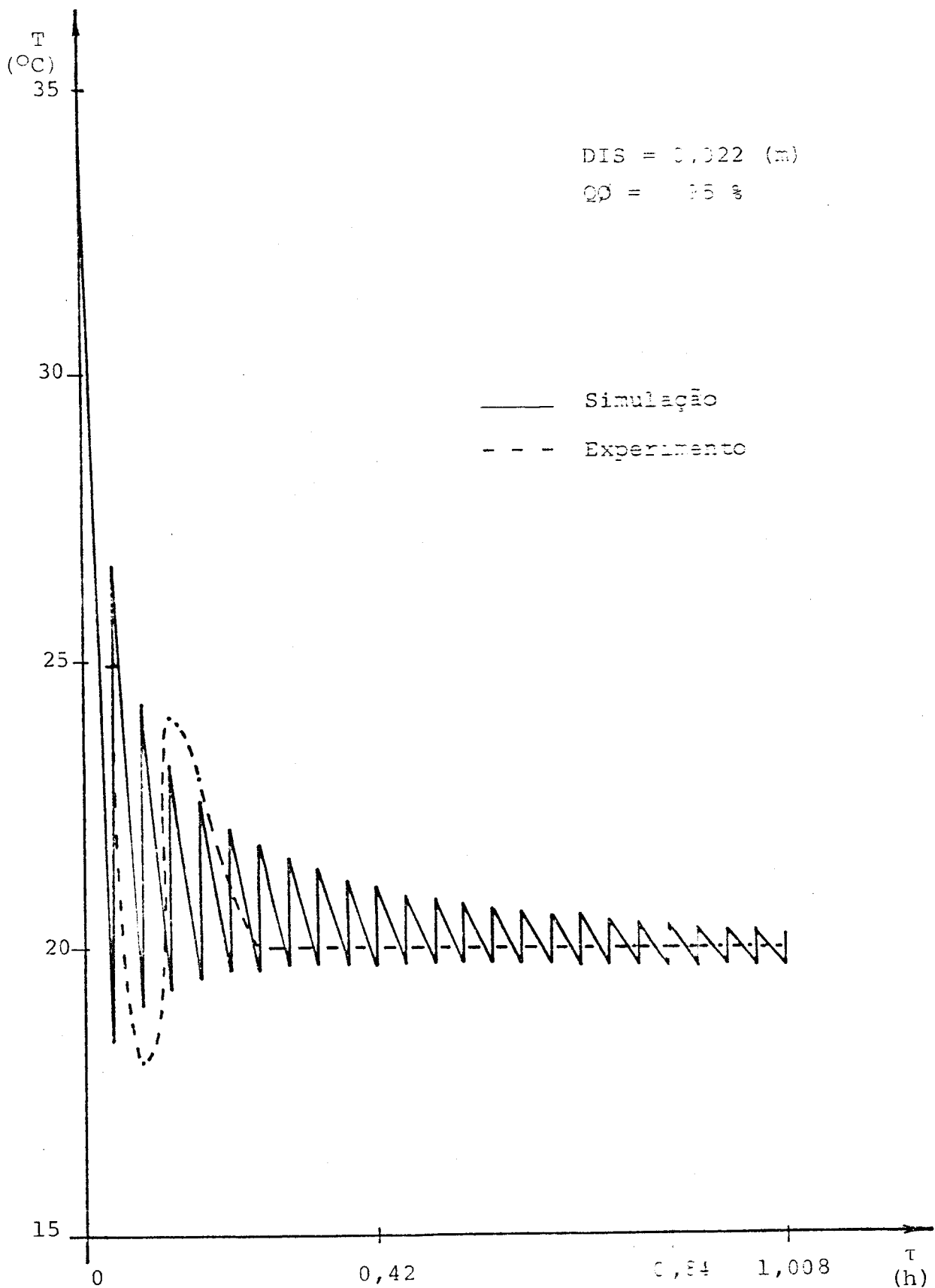


Fig.A.2 Variação da temperatura do "leite" durante a primeira ordenha.

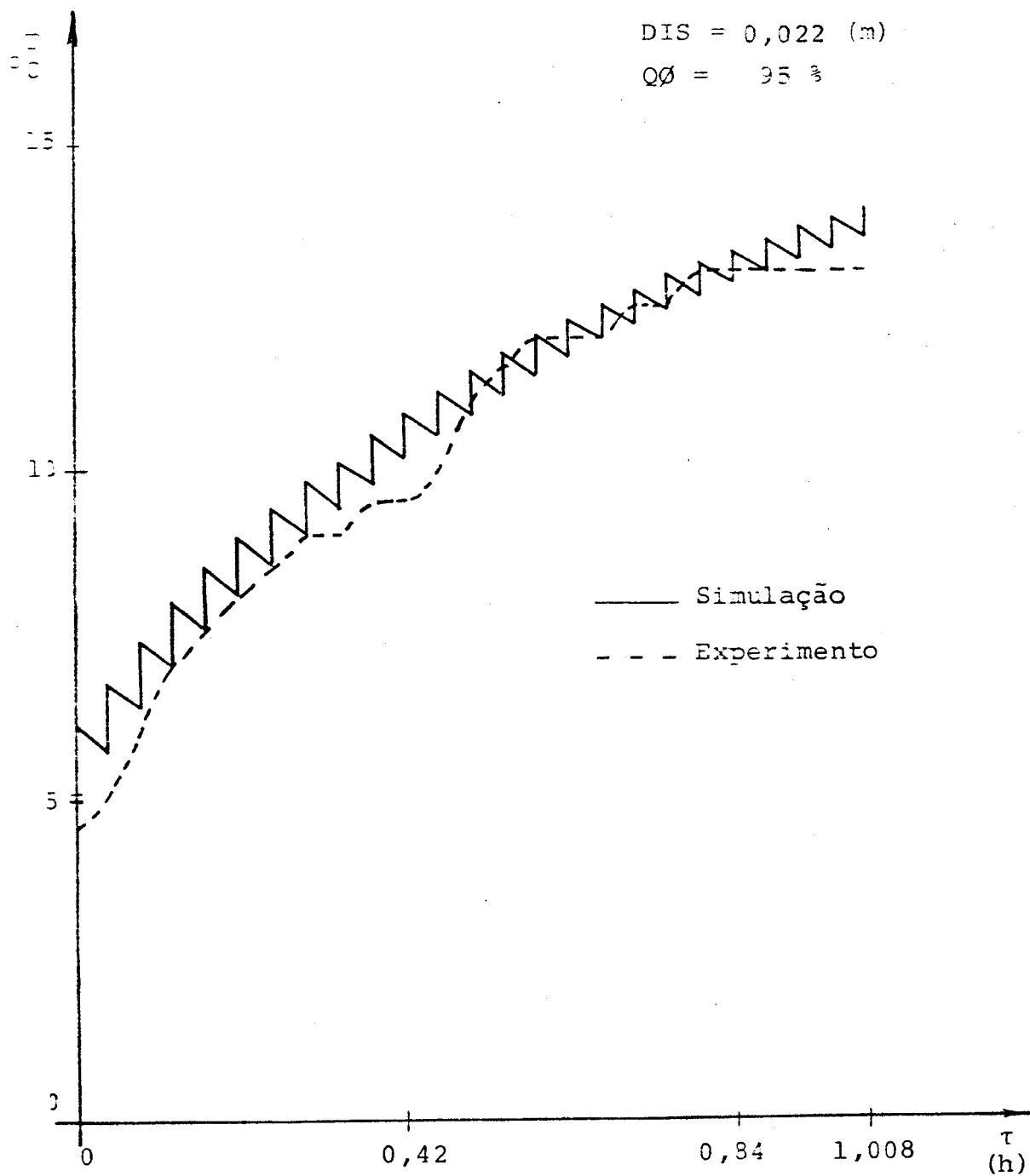


Fig. A.3 Variação da temperatura do "leite" durante a segunda ordenha.

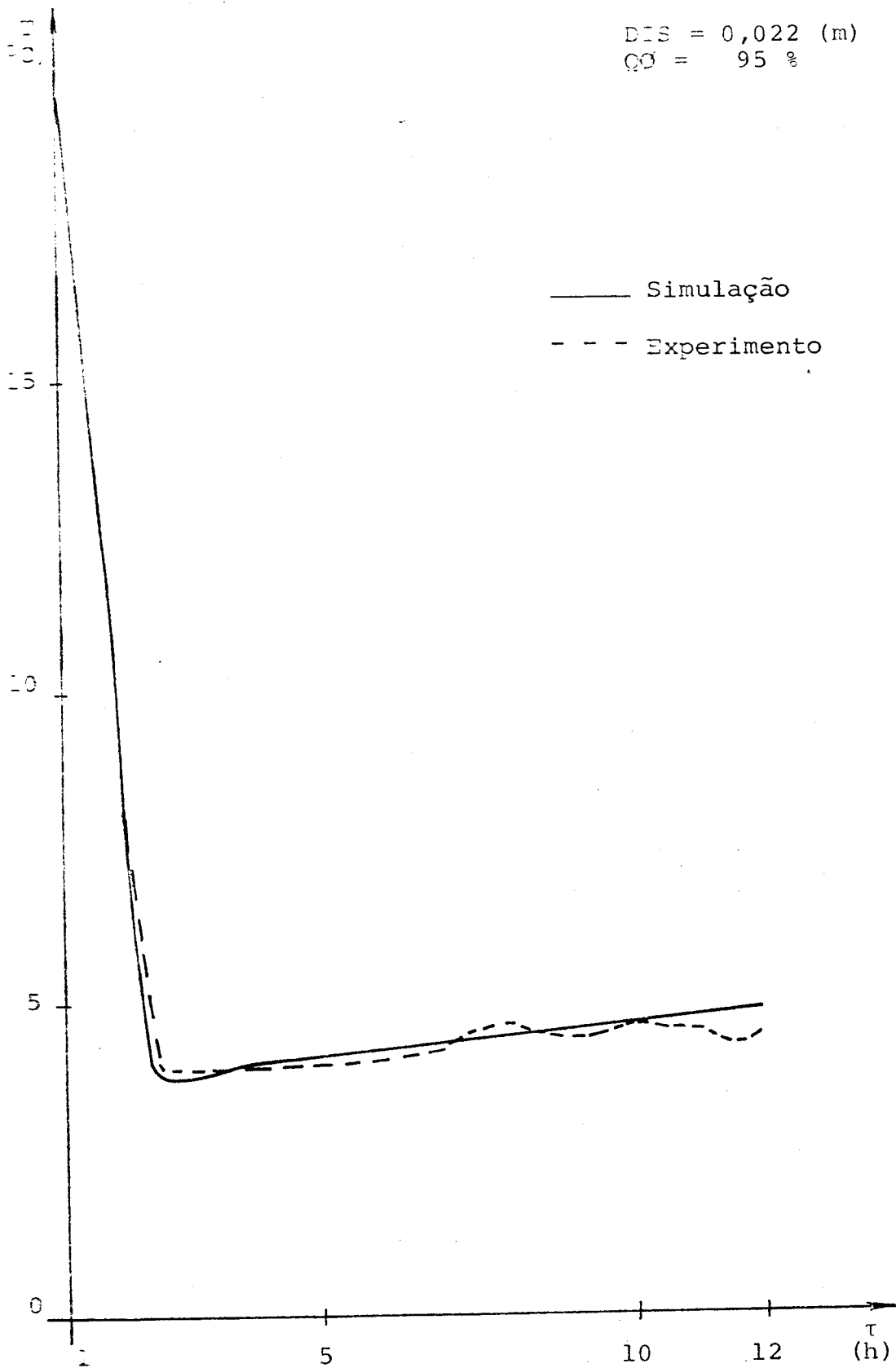


Fig.A.4 Variação da temperatura do "leite" entre as duas ordenhas.

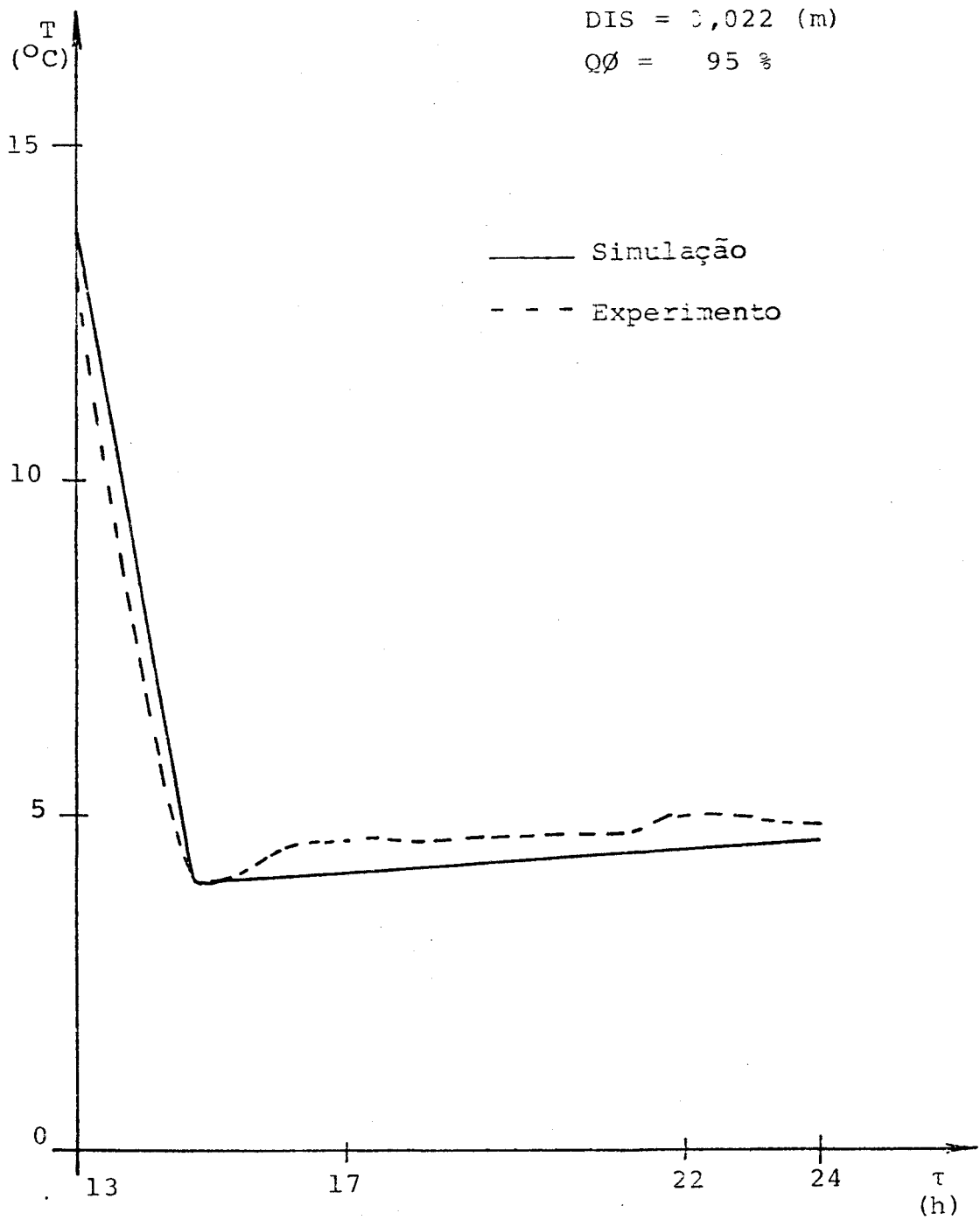


Fig. A.5 Variação da temperatura do "leite" depois da segunda ordenha.

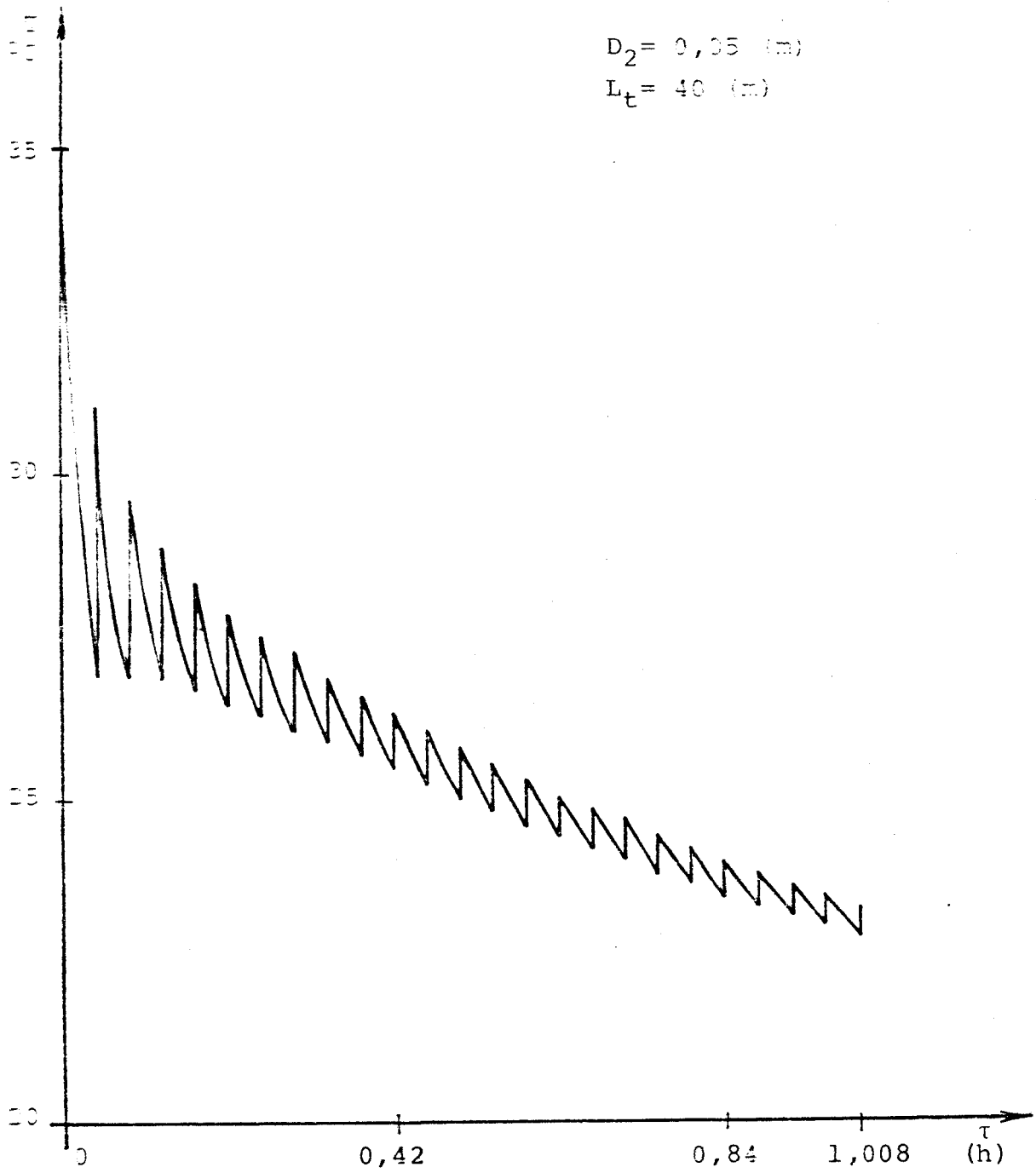


Fig. A.6 Variação da temperatura do "leite" durante a primeira ordenha. (Acumulação)

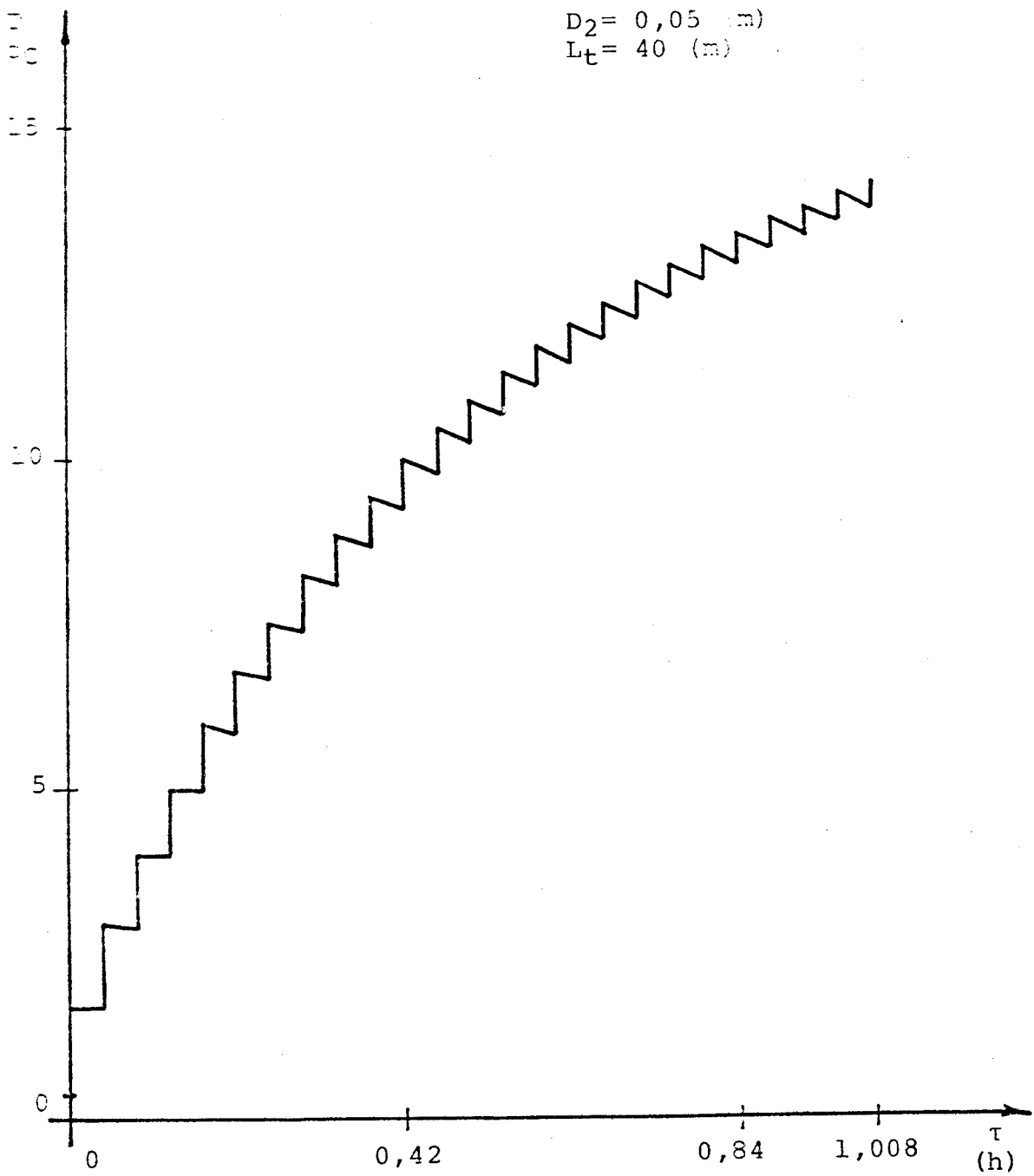


Fig.2.7 Variação da temperatura do "leite" durante a segunda ordenha. (Acumulação)

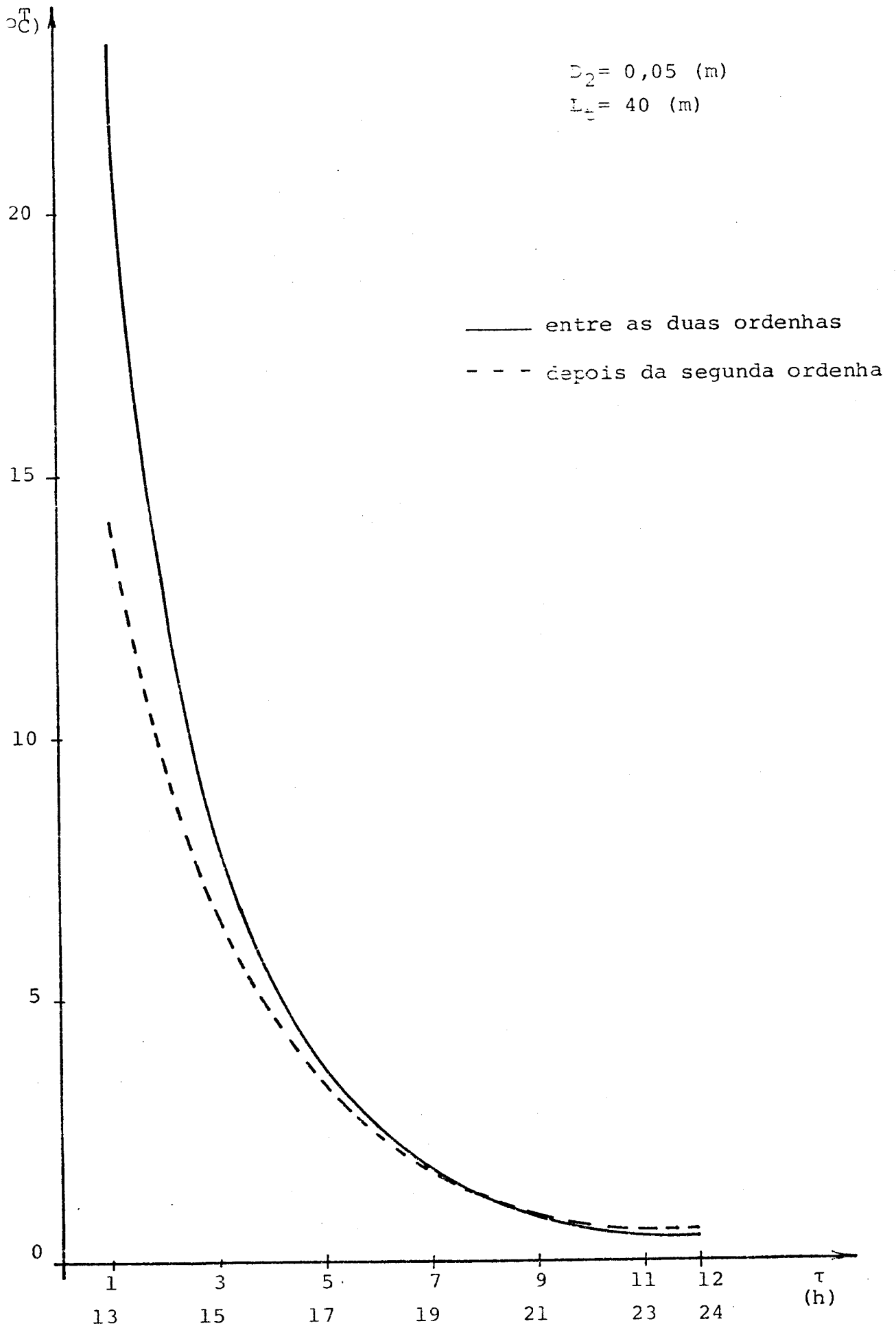


Fig.A.8 Variação da temperatura do "leite" entre as duas

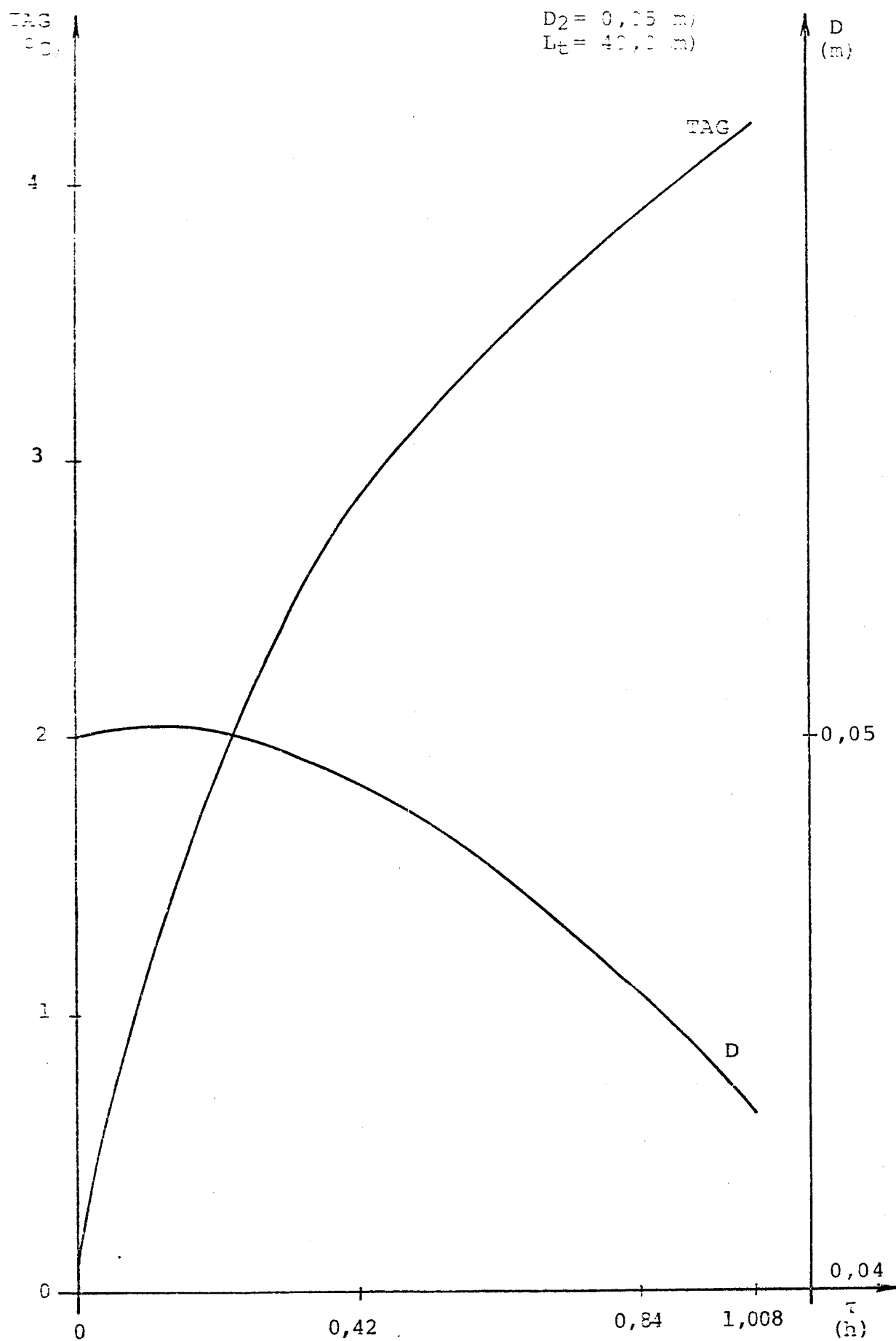


Fig. A.9. Variação da temperatura da água de resfriamento e do diâmetro do gelo durante a primeira ordenha. (Acumulação)

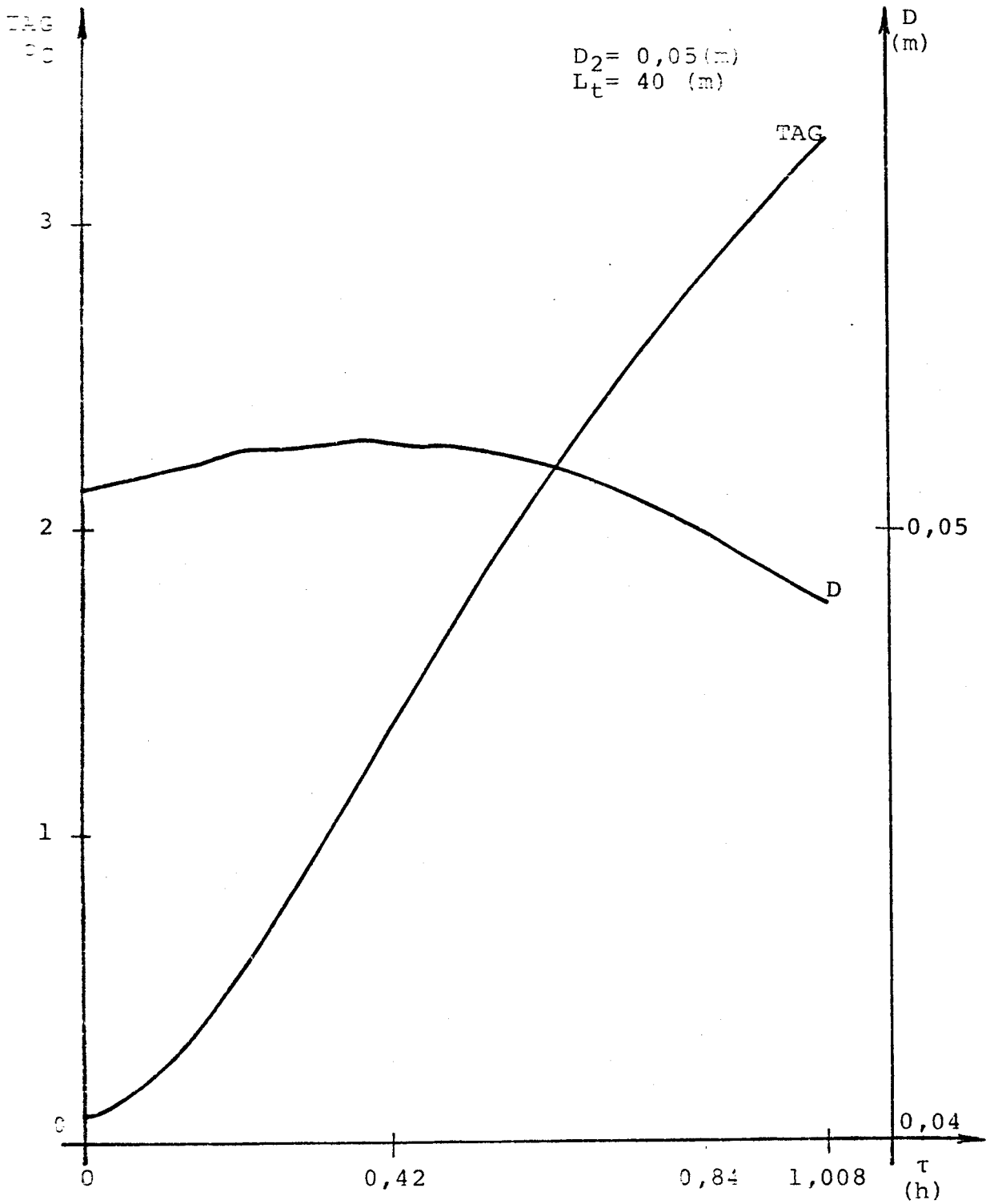


Fig.A.11 Variação da temperatura da água de resfriamento e do diâmetro do gelo durante a segunda ordenha.
(Acumulação)

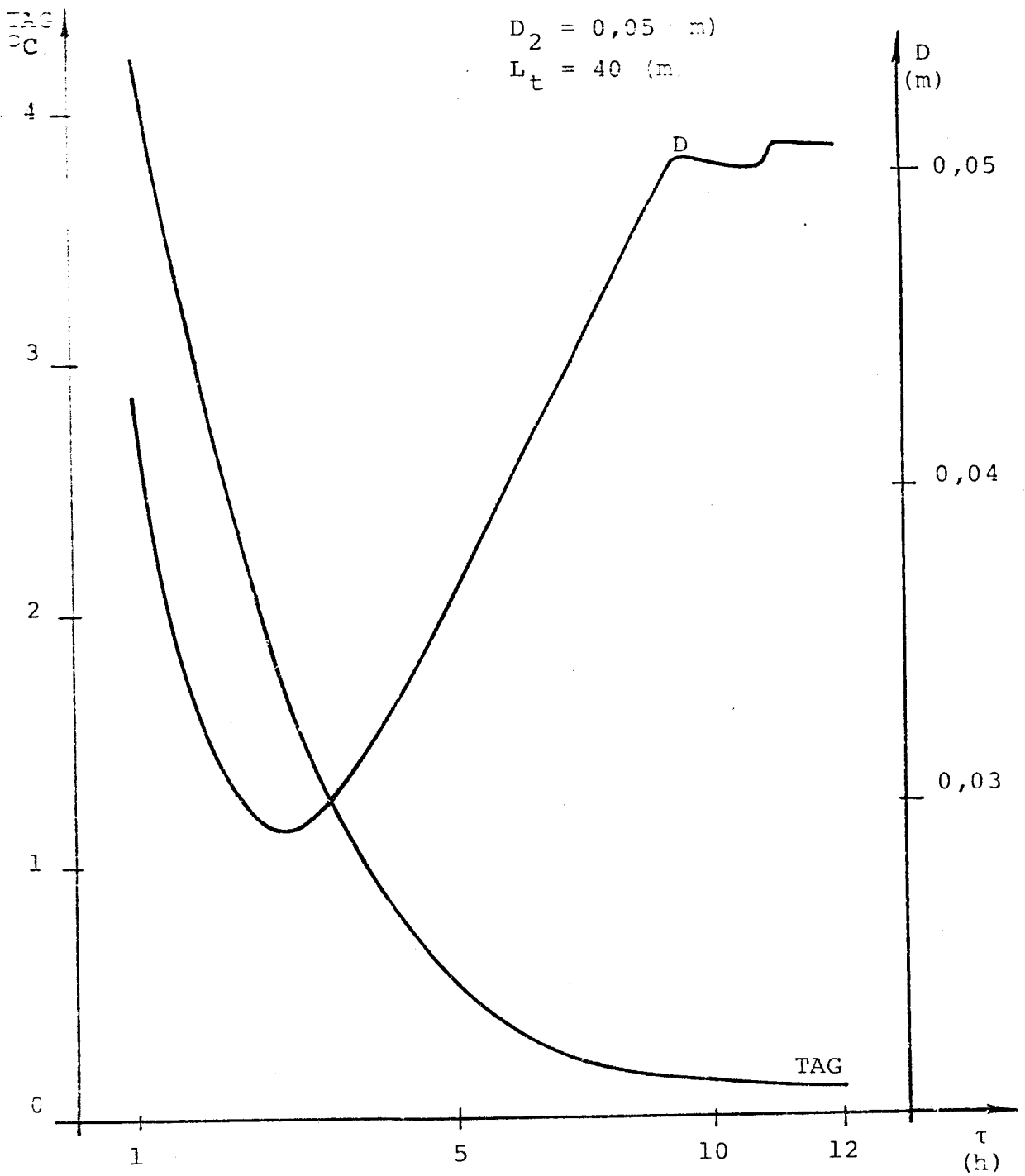


Fig. A.11 Variação da temperatura da água de resfriamento e do diâmetro do gelo entre as duas ordenhas. (Acumulação).

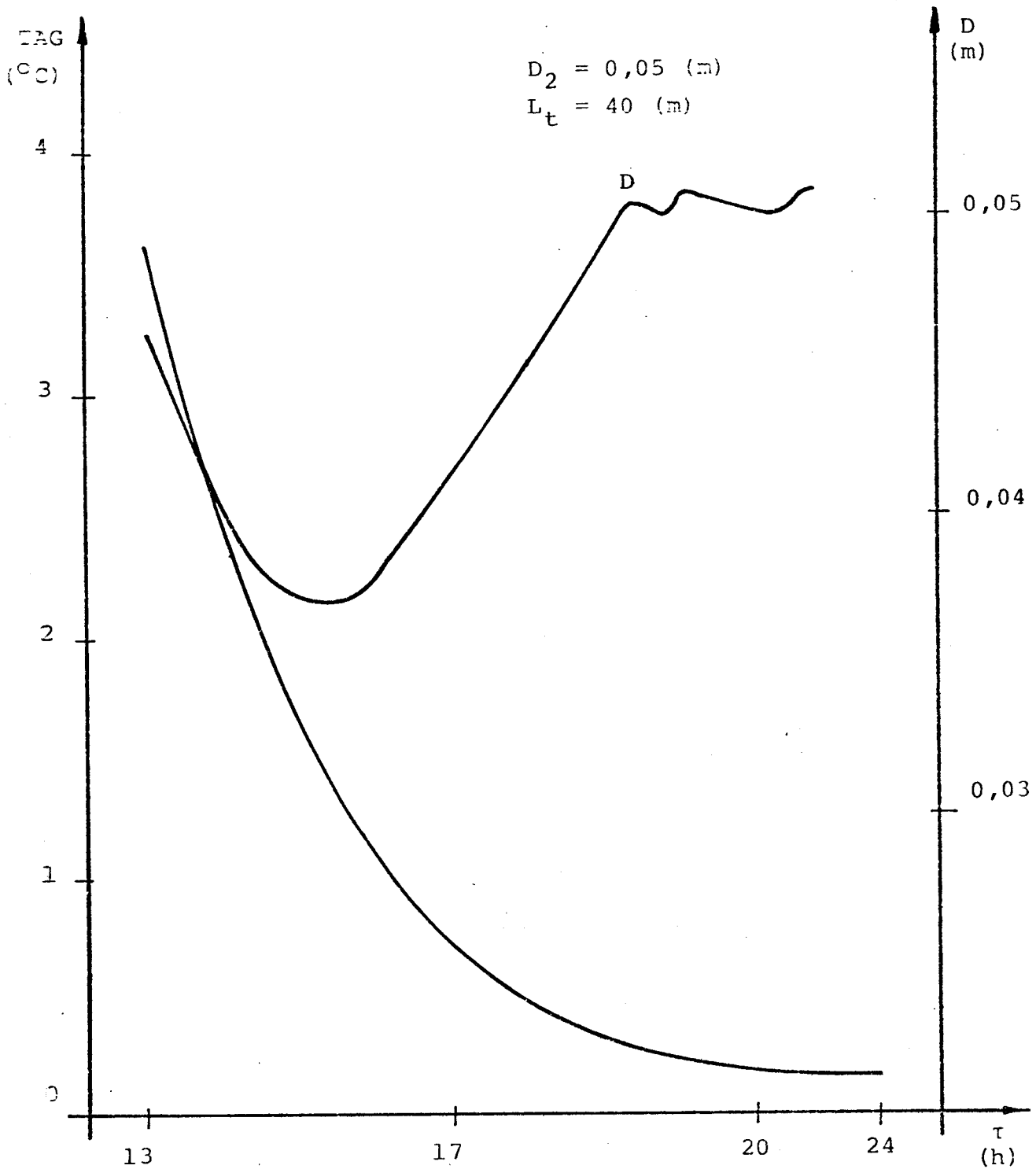


Fig. A.12 Variação da temperatura da água de resfriamento e do diâmetro do gelo depois da segunda ordenha. (Acumulação)

BIBLIOGRAFIA

- (1) Plank, R.: "Handbuch der Kältetechnik" , v.10
Springer-Verlag, 1960
(Alemanha Ocidental)
- (2) "Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal".
Ministério da Agricultura, Departamento Nacional de Inspeção de Produtos de Origem Animal. Impresso SALEM
- (3) Coulson, J.U., Richardson, J.F.: "Chemical Engineering"
PERGAMON PRESS, 1970
- (4) Emblik, E.: "Kälteanwendung"
Verlag G. Braun Karlsruhe, 1971
(Alemanha Ocidental)
- (5) Mc Adams, W.: "Heat Transmission", 3.ed.
Mc Graw-Hill Book Company, 1954
- (6) Chilton, T.H., Drew, T.B., Jebens, R.H.: "Heat Transfer Coeficients in Agitated Vessels"
Industrial Engineering Chemistry, 36, 1944, p.510
- (7) Cummings, G.H., West, A.S.: "Heat Transfer Data for Kettles with Jackets and Coils"
Industrial Engineering Chemistry, 42, 1950, p.2303
- (8) Komondy , Z., Halász, L.: "Hütögépek"
Tankönyvkiadó, 1970
(Hungria)
- (9) ASHRAE "Handbook of Fundamentals". American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers INC, 1977
George Banta CO. INC., USA

- (10) Chawla, J.M.: "Wärmeübergang und Druckabfall in waagerechten Rohren bei der Strömung von Verdampfenden Kältemitteln"
VDI - Forschungsheft, 523, 1967
(Alemanha Ocidental)
- (11) Achtziger, J.: "Experimental Determination of the Equivalent Thermal Conductivity of Air Spaces at Low Temperatures"
International Institute of Refrigeration, Annexe 1976,
2 pp.43-53
- (12) Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P.: "Handbook of Heat Transfer"
Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1973
- (13) Plank, R.: "Handbuch der Kältetechnik", v.3
Springer-Verlag, 1959
(Alemanha Ocidental)
- (14) Stoecker, W.F.: "Design of Thermal Systems"
Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1971
- (15) Stoecker, W.F.: "A generalized Program for Steady State System Simulation"
ASHRAE Transactions, 77, 1971, pp.140-148
- (16) Salvetti, D.D., Azevedo, A.S.: "Elementos de Programação. Fortran IV"
Companhia Editora Nacional, 1976
- (17) Maquot, G.: "Progrès dans les Méthodes d'amélioration de la Qualité Bactériologique du Lait Depuis la Traite à la Ferme Jusqu'à l'atelier de Transformation".
La Revue Générale du Froid, Junho 1961, pp.607-615,
(França)
- (18) Gac, A.: "Technique de Refroidissement et de Conservation du Lait à la Ferme"
La Revue Générale du Froid, Junho 1961, pp.621-633,
(França)

- (19) Gac, A., Schiltz, J.: "Étude Experimental Relative au Refroidissement du Lait à la Production"
La Revue Générale du Froid, 1960, N° 7, pp.597-631
(França)
- (20) Gac, A.: "Quelques Problèmes Thermiques du Refroidissement du Lait à la Production"
La Revue Générale du Froid, 1964, N° 8, pp.927-938
(França)
- (21) Leschot, J.: "Le Problème du Refroidissement du Lait à la Ferme"
La Revue Générale du Froid, 1961, N° 6, pp.669-675
(França)
- (22) Gac, A., Schiltz, J.: "Étude Experimental Relative au Refroidissement du Lait à la Production"
La Revue Générale du Froid, 1960, N° 8, pp.707-723
(França)
- (23) Gac, A.: "Technique de Refroidissement et de Conservation du Lait à la Ferme"
La Revue Générale du Froid, 1961, N° 6, pp.621-633
(França)
- (24) Gac, A., Schiltz, J.: "Étude Experimental Relative au Refroidissement du Lait à la Production"
La Revue Générale du Froid, 1964, N° 2, pp.185-192
(França)
- (25) Anquez, M.: "Le Refroidissement du Lait à la Production"
La Revue Générale du Froid, 1961, N° 6, pp.639-646
(França)
- (26) "La Réfrigération du Lait à la Ferme". Ministère da Agriculture. La Revue Générale du Froid, 1966, N° 2, pp-175-178
(França)

- (27) Blanc, B.: "Ergebnisse einer vergleichenden Prüfung von Tauchkühlern für die Kühlung nicht vorgekühlter, frisch ermolkener Milch in Kannen"
Schweizerische Milchzeitung, 1974, N^o 36, Maio, pp.621-633
(Suiça)
- (28) Mc Adams, W.H.: "Heat Transmission", 3.ed.
Mc Graw-Hill Book Company Inc., 1954
- (29) Halász, L.: "Tópicos Especiais no Ramo da Refrigeração"
Apostila. Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia,
1978
- (30) Baumeister, Th.: "Mechanical Engineers Handbook"
Mc Graw-Hill, 1958, 6th ed.
- (31) International Institute of Refrigeration.
"Refrigeration Techniques in Developing Countries".
1976
- (32) Plank, R.: "Handbuch der Kältetechnik", v.4
(Refrigerantes). Springer-Verlag, 1956
(Alemanha Ocidental)