

PREVISÃO SIMPLIFICADA DO CONSUMO DE ENERGIA DE UM FREEZER COMERCIAL PARA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS

Fernando Newton Raimundo Jr.

João Manoel Dias Pimenta

Ursula Guerra Ferreira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: raimundo@mecânica.ufu.br

Resumo

Apresentam-se resultados preliminares de uma metodologia para previsão teórica do consumo energético de um *freezer* comercial para a conservação e exposição de produtos alimentícios (carnes) para venda ao consumidor final. Os cálculos do consumo energético foram efetuados considerando: operação contínua/desligamento noturno, estação climática, carga variável/constante, operação em resfriamento/congelamento, temperatura ambiente, etc. Foram considerados quatro tipos de alimentos para os quais calcularam-se propriedades térmicas, tempo de resfriamento/congelamento, bem como a carga térmica em jogo. Entre os objetivos, pretende-se verificar a influência do desligamento noturno do *freezer*, sobre o consumo energético global do equipamento.

Palavras-chave: Refrigeração, Alimentos, Energia, Supermercados.

1. INTRODUÇÃO

A motivação inicial do presente trabalho origina-se na solicitação de uma grande indústria frigorífica nacional especializada no abate, produção e comercialização de carnes, com relação a questão consumo energético vs. qualidade do alimento. A empresa em questão, tem recebido reclamações frequentes por parte do consumidor final com relação as condições de conservação inadequadas de certos itens de sua linha de produtos.

Uma investigação prévia por parte da empresa, revelou que o problema situava-se na etapa final da cadeia de frio, mais precisamente nos freezers localizados nos ponto de venda ao consumidor final em supermercados. Com efeito, verificou-se ser prática comum o desligamento tanto dos freezers quanto do sistema de ar condicionado em supermercados durante o período noturno quando o estabelecimento encontra-se fechado, visando reduzir o valor da fatura mensal paga a concessionária de energia elétrica.

Entretanto, ao mesmo tempo que a economia de energia esperada com o desligamento do freezer não foi demonstrada, não comprovando portanto a redução do consumo esperada, reclamações quanto a qualidade do produto resfriado/congelado, como dito antes tornaram-se frequentes levando a crer que o desligamento do freezer durante a noite é o fator responsável direto pela degradação do produto.

Afim de considerar a questão, estudou-se um modelo típico de freezer comercial vertical do tipo aberto para exposição de produtos congelados e resfriados, implementando-se um programa computacional para a previsão teórica da performance energética do equipamento

em diferentes condições de operação. A figura 1 ilustra de forma bastante simplificada as principais etapas consideradas.

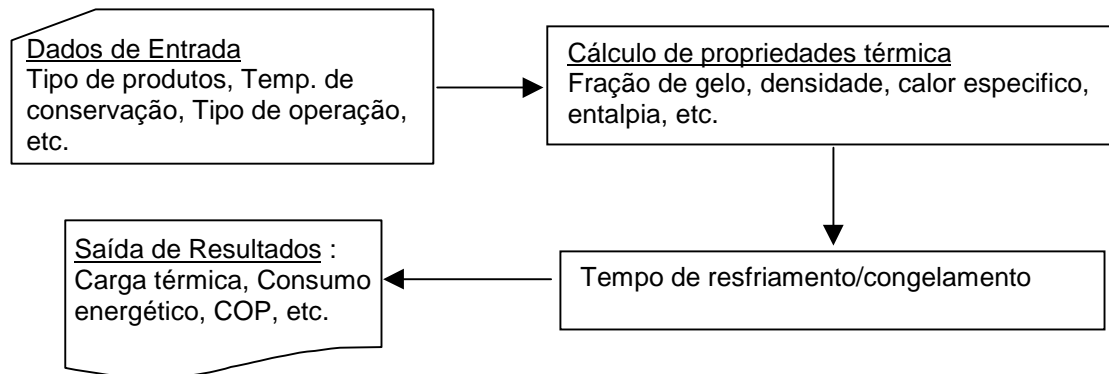


Figura 1: Fluxograma simplificado das etapas para previsão teórica do consumo energético do freezer.

2. CÁLCULO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas dos alimentos devem ser conhecidas quando se deseja realizar cálculos de transferência de calor em equipamentos de refrigeração, e para a determinação dos tempos de refrigeração e congelamento. Uma vez que estas propriedades dependem diretamente da composição do alimento e da temperatura, é praticamente impossível obtê-las tabeladas para todas as condições e composições. Entretanto é possível dispor dos dados de composição dos alimentos através de várias fontes da literatura (ASHRAE, 1993). A tabela 1 apresenta os dados para os alimentos considerados no presente trabalho

Tabela 1. Dados característicos dos produtos considerados.

	X_{wo}	X_p	X_f	X_c	X_{fb}	X_a	t_{if}	c_a	c_b
Bacon	31.6	8.66	57.54	0.09	0.0	2.13	- 2.0	2.09	1.26
Presunto cozido s/ osso	72.6	19.55	7.14	0.0	0.0	1.02	-2.2	2.90	1.46
Salsicha tipo Frankfurt	53.9	11.28	29.15	2.55	0.0	3.15	-1.7	3.60	2.35
Cortes de frango	66.0	18.60	15.06	0.0	0.0	0.79	-2.8	3.31	1.55

onde,

X_{wo}	conteúdo em água do produto (%);	X_c	conteúdo em carboidratos (%);
X_p	conteúdo em proteínas (%);	X_{fb}	conteúdo em fibras (%);
X_f	conteúdo em gorduras (%);	X_a	conteúdo em cinzas (%);
t_{if}	temperatura de início de congelamento [°C];		
c_a	calor específico do produto acima do ponto de congelamento [kJ/kg K];		
c_b	calor específico do produto abaixo do ponto de congelamento [kJ/kg K];		

Com base nessa informação, pode-se empregar equações adequadas ao cálculo das propriedades termofísicas de alimentos. Em seguida são feitos alguns comentários com relação ao cálculo de propriedades termofísicas de alimentos adotados neste trabalho, baseado nos métodos disponíveis na literatura (ASHRAE, 1993)

Para o cálculo da *densidade* é necessário o conhecimento da porosidade do alimento, da fração mássica e da densidade de cada constituinte do alimento. Como os produtos em estudo (carnes) não tem a forma granular, a porosidade é considerada nula.

O *calor específico* é importante no cálculo da carga térmica de refrigeração associada ao congelamento ou resfriamento do produto. Acima do ponto de congelamento (alimentos resfriados) o calor específico torna-se um pouco menor quando a temperatura varia de 0°C para 20°C. Abaixo do ponto de congelamento há um grande decréscimo do calor específico quando a temperatura diminui.

O calor específico dos alimentos acima do ponto inicial de congelamento, pode ser obtido pela média dos calores específicos de seus componentes. Abaixo do ponto inicial de congelamento, o calor sensível devido a mudança de temperatura e o calor latente devido a fusão da água devem ser considerados. Como o calor latente não é determinado para uma temperatura constante, mas para uma faixa de temperatura, um calor específico aparente deve ser calculado para caracterizar os efeitos dos dois calores, latente e sensível.

Vários modelos foram desenvolvidos para calcular o calor específico aparente, sendo neste trabalho considerado aquele proposto por Chen (1985).

A mudança de *entalpia* de um alimento permite estimar a energia que deve ser adicionada ou removida para efetuar a mudança de temperatura desejada. Acima do ponto de congelamento, a entalpia consiste apenas do calor sensível, enquanto que abaixo do ponto de congelamento a entalpia engloba os calores sensível e latente. Geralmente a entalpia é obtida da definição do calor específico à pressão constante, que pode ser integrada com respeito à temperatura.

Para produtos acima de seus respectivos pontos iniciais de congelamento, usou-se o método proposto por Chen (1985), enquanto que para produtos congelados (abaixo do ponto inicial de congelamento) utilizou-se método simplificado do mesmo autor.

A *condutividade térmica* de um alimento depende de sua composição, temperatura e estrutura. Existem mais de um método para calcular a condutividade térmica dos alimentos, sendo que o aqui considerado foi o modelo perpendicular, baseado em analogia com a resistência elétrica conforme Choi e Okos (1986).

Os valores usados no cálculo da *difusividade térmica*, como a densidade, a condutividade e o calor específico, são aqueles determinados segundo os métodos descritos anteriormente.

Com relação ao *coeficiente de transferência de calor* “*h*”, embora não sendo uma propriedade do produto alimentício, seu cálculo é essencial para a análise da transferência de calor convectiva envolvida. Sua determinação baseia-se na conhecida “lei de resfriamento de Newton”.

Como se sabe, o valor de “*h*” entre o produto e o ar no espaço refrigerado depende de parâmetros tais como: velocidade do fluido, geometria, textura, embalagem, etc. A circulação do ar dentro do freezer aumenta o valor de “*h*”, uniformiza a temperatura, e intensifica a evaporação da água do produto, impedindo a elevação da umidade na superfície dos gêneros alimentícios, que criaria condições favoráveis a multiplicação de bactérias.

Na maioria das aplicações “*h*” é determinado experimentalmente, sendo em geral obtidas correlações do tipo $Nu = f(Pr, Re)$, representando a relação funcional entre os conhecidos números adimensionais de Nusselt (*Nu*), Prandtl (*Pr*) e Reynolds (*Re*). No presente trabalho porém, foram consideradas correlações do tipo $Nu = f(Re)$, disponíveis para cada produto.

3. TEMPOS DE RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO

Para que um alimento congele, primeiramente é necessário reduzir a temperatura até o respectivo ponto inicial de congelamento. Até este ponto, somente calor sensível é removido, não havendo mudança de fase nem congelamento do produto. O tempo necessário para atingir o ponto inicial de congelamento, é denominado tempo de resfriamento, sendo influenciado pela razão entre a resistência externa e a resistência interna à transferência de calor, razão esta conhecida como número de Biot.

Diferentes metodologias voltadas para o cálculo do *tempo de resfriamento* encontram-se disponíveis na literatura. No presente trabalho, foi considerado o “Método dos fatores f e j ” proposto por Cleland (1990), que baseia-se no fato de que os processos de *resfriamento* exibem um comportamento similar, havendo após uma fase de latência, um decréscimo exponencial da temperatura do centro térmico do alimento. Os fatores f e j foram calculados segundo métodos de Hayakawa, Villalobos (1989).

É ainda necessário, considerar a forma geométrica do alimento através de um fator de forma. Visto que, a maioria dos alimentos possuem formas irregulares, o presente trabalho considera o método proposto por Smith al. (1968), para o caso de $Bi \rightarrow \infty$.

Em linhas gerais, o algoritmo utilizado para a estimativa do tempo de resfriamento, envolveu os seguintes passos :

1. Determinação das propriedades térmicas;
2. Determinação do coeficiente superficial de troca térmica;
3. Determinação do fator de forma;
4. Cálculo do número de Biot.
5. Cálculo dos fatores f e j ;
6. Cálculo do tempo de resfriamento.

No caso do cálculo do tempo de *congelamento*, conforme discutido anteriormente, este não é um processo isotérmico, em vez disso, o mesmo ocorre numa determinada faixa de temperatura. A maioria dos métodos desenvolvidos para estimar o tempo de congelamento, o calculam como a soma dos tempos de pré-resfriamento, mudança de fase e subresfriamento. Alguns métodos baseiam-se na equação de Plank, outros numa versão modificada da mesma.

O método de Plank embora bastante difundido, apresenta como inconvenientes o fato de assumir que o congelamento ocorra a uma temperatura constante. Além disso, considera constante a condutividade térmica de alimentos congelados (o que não ocorre na realidade), despreza a remoção de calor sensível até o ponto inicial de congelamento, e é aplicável apenas para geometrias infinitas.

Estudadas estas limitações, Cleland e Earle (1987-a 1987-b) acrescentaram correções para considerar o calor sensível e a variação de temperatura durante o processo de congelamento, propondo equações de regressão para estimativa de parâmetros geométricos para geometrias infinitas. Por sua vez, Hung e Thompson (1983) melhoraram a equação de Plank, desenvolvendo um método alternativo para cálculo do tempo de resfriamento de geometrias tipo “fatias” infinitas, incorporando a mudança de entalpia associada ao processo de congelamento e uma diferença de temperatura relativa ao peso médio.

Em linhas gerais, o algoritmo utilizado para a estimativa do tempo de congelamento adotado considerou os seguintes passos :

1. Determinação das propriedades térmicas do alimento;
2. Determinação da diferença de entalpia e calores específicos;
3. Determinação do coeficiente superficial de troca térmica;
4. Determinação da dimensão característica e razões dimensionais;
5. Cálculo dos números adimensionais de Biot, Plank e Stefan;
6. Cálculo de parâmetros segundo o método de Hung e Thompson;
7. Estimar tempo de congelamento (método de Hung e Thompson).

4. CARGA TÉRMICA E BALANÇO ENERGETICO

A carga térmica de cada produto, ou seja, a demanda frigorífica para resfriar ou congelar cada alimento depende das propriedades termofísicas, da temperatura inicial do produto, da temperatura do ar (4°C p/ resfriamento ou -15°C p/ congelamento), da massa total a ser

resfriada, entre outros fatores. Para o cálculo da demanda frigorífica utilizou-se a seguinte equação:

$$Q_p = m c_p (T_{ap} - T_{ao}) \quad (1)$$

onde,

Q_p	demanda frigorífica da quantidade total de cada produto no freezer	[kJ];
m	massa total do produto	[kg];
c_p	calor específico do produto	[kJ / kg.K];
T_{ap}	temperatura inicial do produto	[°C];
T_{ao}	temperatura do ar no freezer, ou temperatura final desejada do produto	[°C].

Para obter a taxa de calor devido a cada alimento, divide-se o valor dado pela Eq. (1), pelo tempo de resfriamento ou congelamento, o que deve corresponder a demanda frigorífica calculada através do coeficiente superficial de troca térmica “ h ”. A taxa de transferência de calor por condução foi desprezada em relação a parcela convectiva, considerando-se :

$$q_p = h A (T_{ap} - T_{ao}) = \frac{m c_p (T_{ap} - T_{ao})}{\theta} \quad (2)$$

sendo,

q_p	taxa de calor a ser retirada de cada produto	[kJ/ s = kW]
h	coeficiente superficial de troca térmica	[W/ m ² .K]
A	área de troca térmica, correspondente a área total ocupada pelo produto	[m ²]
θ	tempo de resfriamento ou congelamento	[s]

Para simular a operação do freezer quando a quantidade de produtos (carga em kg) estivesse variando, foram considerados dados de carga e descarga, baseados em valores estatísticos arbitrários de venda diária de cada produto. Assim, pode-se ter em conta a variação da carga de alimentos no interior do freezer.

A velocidade do ar no interior do freezer, foi considerada constante e correspondente a uma vazão volumétrica da ordem de 0,9 m³/s. A variação das propriedades do ar com a temperatura, foi considerada através de expressões adequadas. Para cálculo do número de Reynolds e subsequente aplicação da relação $Nu = f(Re)$ e cálculo de h , tomou-se como dimensão característica do problema a altura da prateleira, uma vez que esta foi considerada completamente ocupada pelo produto.

Dados de performance previamente disponíveis, relacionando potência frigorífica \dot{Q}_{ev} e potência consumida pelo compressor \dot{W}_{cp} em função das temperaturas de condensação T_{cd} e de evaporação T_{ev} , foram usadas no estabelecimento de equações polinomiais do tipo $\dot{W}_{cp} = f(T_{cd}, T_{ev})$ e $\dot{Q}_{ev} = f(T_{cd}, T_{ev})$. Tanto no resfriamento quanto no congelamento, os graus de superaquecimento e subresfriamento foram de 18 K e 8,3 K, respectivamente.

O condensador e o evaporador do freezer são do tipo serpentina aletada, com o refrigerante escoando no interior dos tubos. Dados do fabricante relacionando o coeficiente global de troca térmica do condensador UA_{CD} e do evaporador UA_{EV} com os pontos de operação em resfriamento e congelamento, foram considerados para obtenção de relações polinomiais do tipo $UA_{CD} = f(T_{cd}, T_{ev})$ e $UA_{EV} = f(T_{cd}, T_{ev})$.

O ganho de calor do ambiente (supermercado) através de paredes e abertura do freezer, foi calculado tomando-se um coeficiente global de troca térmica entre o freezer e o ambiente, cujo valor aproximado é de 15 W.K⁻¹.

Quando o sistema de ar condicionado encontra-se em operação, a temperatura ambiente no interior do supermercado é considerada constante. Por outro lado, quando se opta pelo desligamento noturno do sistema de ar condicionado, deve-se considerar o aumento no tempo da temperatura interior da loja devido a troca de calor com o meio exterior, cujos dados meteorológicos locais foram considerados. Com isto, tem-se em conta a quantidade adicional de energia requerida devido à troca térmica entre o espaço refrigerado e o ambiente.

5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Deseja-se obter o consumo energético do freezer em condições padrões, e também verificar a influência do desligamento do freezer durante a noite entre outros aspectos.

Para uma implementação preliminar desenvolveu-se um programa específico utilizando o *software* MATLAB 5.0 (Math Works Inc.,1996). Foram considerados quatro produtos, e propostas as opções operacionais indicadas na Tabela 2, a serem especificadas pelo usuário.

Tabela 2 - Relações das condições operacionais a serem indicadas pelo usuário.

1	Condição de conservação dos produtos: [1] Resfriamento, ou [2] Congelamento;
2	Estação climática: [1] Verão [2] Outono [3] Inverno [4] Primavera
3	Condições de operação do refrigerador: [1] Continua (24 horas /dia) ou [2]Desligado no período noturno (das 23:00 às 05:00 horas);
4	Operação do sistema de ar condicionado local: [1] Continuo (24 horas / dia) ou [2] Desligado no período noturno (das 23:00 às 05:00 horas);
5	Condições de carregamento diário do refrigerador: [1] Constante, ou [2] Variando hora a hora, durante o horário de funcionamento do estabelecimento;
6	Temperatura inicial de cada produto (no momento da carga);
7	Temperatura de resfriamento ou congelamento, desejada para o produto;
8	Carga inicial [kg] de cada produto.

Combinando as condições operacionais, indicadas pelo usuário conforme descrito na tabela anterior, o programa desenvolvido, fornece, entre outros, os seguintes resultados principais :

- Carga térmica [kJ];
- Tempo de resfriamento ou congelamento [h];
- Taxa de transferencia de calor [kW] para cada produto no refrigerador;
- Consumo energético total [kW] do refrigerador;
- Custo em unidades monetárias correntes (R\$) da energia consumida pelo refrigerador, com base na tarifa padrão do kWh praticada pela concessionária

Assim, o usuário pode simular diferentes condições operacionais do refrigerador, e então comparar os resultados afim de saber se as medidas adotadas (ou a adotar) podem ou não resultar numa redução efetiva do consumo energético do sistema de refrigeração. Dadas as limitações de espaço, aqui serão apenas apresentados dois exemplos.

Vamos a seguir ilustrar uma das possíveis condições de operação, entre as variações disponíveis conforme se vê pela Tabela 2. Para as condições de operação do freezer, conforme apresentado na Tabela 3, o programa desenvolvido fornece os resultados apresentados na Tabela 4.

Para esta situação específica de simulação, o custo operacional devido a demanda energética do *freezer* seria de R\$ 30,87/semana, enquanto que para as mesmas condições mas optando-se pelo desligamento do refrigerador entre 23:00 e 05:00 horas, o custo devido ao consumo energético do refrigerador seria de R\$ 32,70/semana.

Tabela 3 – Uma possível combinação das condições de operação do refrigerador:

1	Condição de conservação dos produtos =	[1] Resfriamento
2	Estação Climática =	[1] Verão
3	Condições de operação do refrigerador =	[1] Contínuo (24 horas / dia)
4	Operação do sistema de ar condicionado local =	[1] Contínuo (24 horas / dia)
5	Condições de Carregamento diário do refrigerador =	[1] Constante
6	Temperatura inicial de cada produto =	25 °C (temperatura ambiente)
7	Temperatura de conservação desejada =	4,0 °C
8	Massa inicial [kg] de cada produto:	Bacon = 100 kg Presunto = 150 kg Salsicha = 200 kg Frango = 180 kg

Tabela 4 - Resultados obtidos para as condições de operação listadas na tabela 3.

Produtos:	Carga Térmica [kJ]	Tempo de Resfriamento (horas)	Taxa de Calor por produto (kW)
Bacon	5635	2.71	0.58
Presunto	11298	2.37	1.32
Salsicha	13214	2.87	1.28
Frango	13037	2.95	1.23
Total	43184	-----	4.41

A figura 2 apresenta um dos gráficos fornecidos pelo programa desenvolvido que representa para o segundo exemplo abordado, curvas de variação da temperatura em função do tempo de resfriamento necessário para que o produto chegue a temperatura de resfriamento de 4 °C, a partir de uma temperatura ambiente inicial de 25 °C.

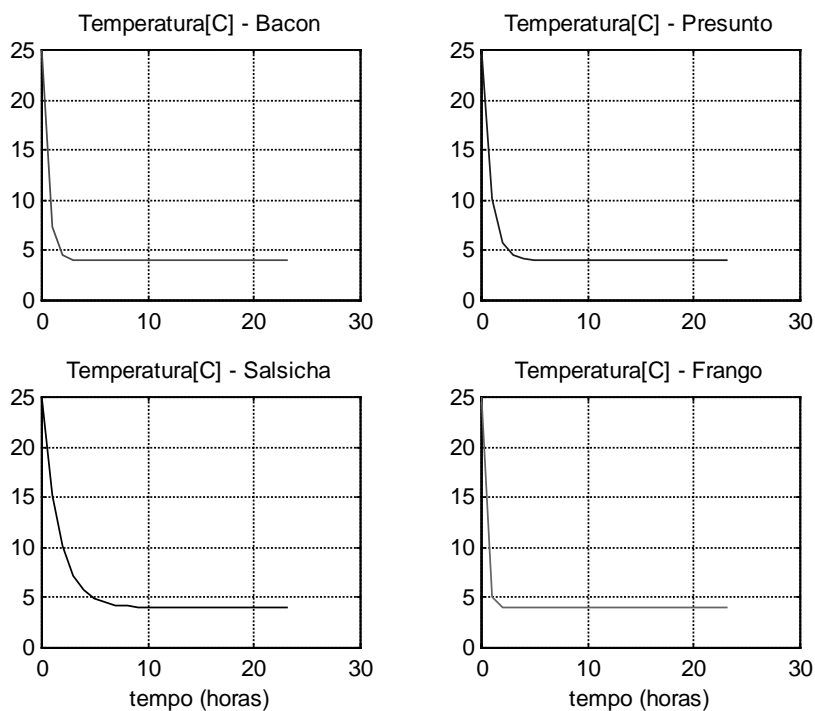


Figura 2 - Variação da temperatura de cada produto com o tempo de resfriamento.

6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Considerando-se apenas os dois exemplos apresentados, os resultados da simulação indicam um custo devido ao desligamento do refrigerador no período noturno maior do que quando este encontra-se ligado 24 horas por dia. A diferença obtida foi de R\$7,32/mês no consumo, para os dados considerados na simulação.

Não é no momento possível quantificar a margem de erro implícita nos resultados apresentados, sendo que uma confrontação contra resultados experimentais seria necessária afim de estabelecer tal parâmetro, bem como validar o modelo proposto. Além disso, o presente trabalho consiste numa primeira tentativa de simulação do consumo energético de um freezer comercial, sendo por isso bastante simplificado e, pode-se supor, sujeito a erros consideráveis.

Os dados utilizados, dimensões e capacidade do refrigerador, bem como sua capacidade de armazenamento, utilizados nos dois exemplos apresentados são valores aproximados, que posteriormente poderão ser corrigidos para valores mais próximos à realidade de um supermercado de grande porte, por exemplo.

É portanto necessário analisar passo-a-passo os procedimentos, equações, dados iniciais e simplificações adotados, introduzindo as correções e melhoramentos necessários no programa computacional desenvolvido.

Ainda assim, mesmo com as considerações e aproximações feitas, a metodologia utilizada gerou resultados coerentes. O caso por exemplo da obtenção de um consumo energético menor na operação contínua do freezer do que quando este é desativado durante o período noturno, poderia ser justificada pelo acréscimo de demanda frigorífica que ocorre quando o freezer é re-ligado pela manhã e deve operar a níveis de potência elevados até que o *set-point* seja novamente atingido.

Deve-se ressaltar que os dois exemplos apresentados, consideraram apenas o efeito do desligamento do refrigerador durante as 06 horas do período noturno. Muitas outras condições de operação podem ser analisadas. As variações da temperatura de acordo com a estação do ano, as variações de carga durante o período de funcionamento do supermercado, o ligamento e desligamento do ar condicionado, são condições de operação possíveis de serem analisadas através do programa computacional previamente desenvolvido e que no momento não são possíveis de serem abordadas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPEMIG – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de Minas Gerais, pelo apoio prestado no âmbito do convênio Fapemig/Fiemg.

8. REFERÊNCIAS

- ASHRAE, 1993, “Fundamentals - Handbook”, American Society of Heating Ventilation and Air Conditioning Engineers, SI Edition, Atlanta, USA.
- Chen, C.S., “Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Enthalpy and apparent specific heat.” *Journal of Food Science* 50:1158.
- Choi, Y., and Okos, M.R.,1986, “Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. “Food Engineering and Process Applications.” Ed. M. LeMaguer and P. Jelen, 1:93-101. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Cleland, A . C. , 1990, “Food refrigeration process: Analysis, design and simulation. London: Elsevier Science Publishers.

- Cleland, D.J. Cleland, A . C. and Earle, R.L., 1987-a, “Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae – Part 1: Regular shapes.” *International Journal of Refrigeration* 10(3): 153-164.
- Cleland, D.J. Cleland, A . C. and Earle, R.L., 1987-a, “Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae – Part 2: Irregular shapes.” *International Journal of Refrigeration* 10(4): 234-240.
- Hayakawa, K. and Villalobos, G. , 1989. “Formulas for estimating Smith et al. Parameters to determine the mass average temperature of irregularly shaped bodies.” *Journal of Food Process Engineering* 11(4): 237-256.
- Hung, Y.C. and Thompson, D.R., 1983, “Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by na improved analytical method.” *Journal of foode Science* 48(2): 555-560.
- MATLAB – 5.0 , 1996, *The Language of Technical Computing*, The Math Works Inc.
- Smith, R. E., Nelson, G.L. and Henrickson, R.L., 1968, “Applications of geometry analysis of anomalous shapes to problems in transient heat transfer.” *Transactions of the ASAE* 11(2): 296-302