



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Engenharia

Campus de Bauru

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
TÉRMICO E ELÉTRICO DO REFRIGERADOR DOMÉSTICO**

SIDNEY YAMAMOTO

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP - Campus de Bauru,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.**

BAURU – SP

Janeiro – 2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Engenharia

Campus de Bauru

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
TÉRMICO E ELÉTRICO DO REFRIGERADOR DOMÉSTICO**

SIDNEY YAMAMOTO

Orientador: **Prof. Dr. Edwin Avolio**

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP - Campus de Bauru,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.**

BAURU – SP

Janeiro – 2006

DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP – BAURU

Ficha catalográfica elaborada por Maristela Brichi Cintra CRB 5046

Yamamoto, Sidney.

Análise teórica e experimental do comportamento
térmico e elétrico do refrigerador doméstico / Sidney
Yamamoto. - - Bauru : [s.n.], 2006.

87 f.

Orientador: Edwin Avólio.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, 2006.

1. Refrigerador. 2. Variação de velocidade. 3. Motor de
indução. I – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II - Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu irmão Wellington Yamamoto, que na sua plenitude de vida, incentivou e me orientou nos momentos de maior dificuldade neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edwin Avolio, pela excelente orientação fornecida, confiança e dedicação.

Ao Prof. Dr. Alcides Padilha, pelas contribuições ao desenvolvimento do sistema térmico.

Ao Prof. Dr. Mário Eduardo Bordon, pela contribuição na lógica de raciocínio para modelagem do sistema computacional.

À minha esposa Meire Nakamura Yamamoto que me impulsionou e apoiou ativamente para a realização desta etapa de minha vida.

Ao amigo Fábio Franco da ECOM Sistemas pela ajuda atribuída sempre que necessário.

Aos amigos da AMBEV, Carlos Roberto Covolan e Marcelo Nishida pelo incentivo, apoio e compreensão.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Elétrica da Faculdade de Engenharia e tecnologia – UNESP/BAURU, pelos equipamentos cedidos para realização dos ensaios.

Aos meus pais, pela paciência e compreensão.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Organização da dissertação	3
1.3 - Sistema de refrigeração	4
CAPÍTULO 2 - ANALOGIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE UM CIRCUITO ELÉTRICO E DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - Sistema de refrigeração	7
2.3 - Circuito elétrico com fonte de corrente parcial P1	10
2.3.1 - Determinação da equação da tensão V_e	11
2.3.2 - Determinação da equação da tensão em V_c	16
2.4 - Circuito elétrico com fonte de corrente parcial P2	19
2.5 - Análise por semelhança entre as equações térmicas e as equações desenvolvidas a partir do equacionamento do circuito elétrico RC com fonte de corrente	21
2.6 - Determinação dos coeficientes em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente .	24

2.6.1 – Determinação do coeficiente $A_3 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	25
2.6.2 - Determinação do coeficiente $A_1 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	26
2.6.3 - Determinação do coeficiente $A_2 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	28
2.6.4 - Determinação do coeficiente $A_6 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	28
2.6.5 - Determinação do coeficiente $A_5 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	30
2.6.6 - Determinação do coeficiente $A_4 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	31
2.6.7 - Determinação do coeficiente $A_9 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	31

2.6.8 - Determinação do coeficiente $A_8 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente.	33
2.6.9 - Determinação do coeficiente $A_7 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente	34
CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA	35
3.1 - Introdução	35
3.2 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico com capacitor de partida	36
3.3 – Comportamento conjugado-escorregamento do motor de indução monofásico com variação de velocidade	39
3.4 – Variação de velocidade através do controle da tensão e da frequência do motor monofásico	40
CAPÍTULO 4 - APLICATIVOS COMPUTACIONAIS	41
4.1 - Introdução	41
4.2 – Diagrama de blocos simplificado do aplicativo computacional para simulação do comportamento térmico. .	42
4.3 - Diagrama de blocos simplificado do aplicativo computacional para simulação do desempenho do motor de indução.	43
4.4 – Apresentação das rotinas e sub-rotinas utilizadas	44
4.4.1 – Rotina PRINCIPAL	44
4.4.2 – Sub-rotina SUBROTINA_MTR_1F	44

4.4.3 – Sub-rotina SUBROTINA_MTR_1F_RUN	45
4.4.4 – Sub-rotina SUBROTINA_REG_CONT	45
4.4.5 – Sub-rotina SUBROTINA_RPM	45
4.4.6 – Sub-rotina SUBROTINA_ONOFF	45
4.4.7 – Sub-rotina SUBROTINA_RPM_X_ONOFF	46
4.4.8 – Sub-rotina SUBROTINA_SENSORES	46
CAPÍTULO 5 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS	47
5.1 - Introdução	47
5.2 – Sistema experimental	47
CAPÍTULO 6 - COMPARAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	58
6.1 - Introdução	58
6.2 – Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do sistema térmico em regime contínuo.....	58
6.3 - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do sistema térmico em regime ON- OFF.....	63
6.4 – Comentários	63
CAPÍTULO 7 - UTILIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO PARA ANALISAR O COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO OPERANDO COM VELOCIDADE VARIÁVEL	70
7.1 – Resultados obtidos nas simulações do sistema elétrico análogo ao sistema térmico para variação de velocidade (RPM)	70

7.2 – Resultados obtidos nas simulações do motor de indução monofásico.....	75
7.3 - Comentários.....	81
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES.....	82
SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	84
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	85

LISTA DE SÍMBOLOS

a - relação de proporcionalidade entre as espiras do enrolamento auxiliar e enrolamento principal do estator

$A_{1(RC)}$, $A_{2(RC)}$, $A_{3(RC)}$, s_1 e s_2 - coeficientes da curva de V_e em Regime Contínuo

$A_{4(RC)}$, $A_{5(RC)}$, $A_{6(RC)}$, s_4 e s_5 - coeficientes da curva de V_c em Regime Contínuo

$A_{7(RC)}$, $A_{8(RC)}$, $A_{9(RC)}$, s_7 e s_8 - coeficientes da curva de V_f em Regime Contínuo

b_F - Transmitância térmica global do congelador [J/s.°C]

b_p - Transmitância térmica global do gabinete de refrigeração [J/s.°C]

C_c - capacitância de regulação de tensão do nó V_c

C_{e1} - capacitância de regulação de tensão do nó V_e do circuito com fonte de corrente P_1

C_{e2} - capacitância de regulação de tensão do nó V_e do circuito com fonte de corrente P_2

C_f - capacitância de regulação de tensão do nó V_f

d - relação Volts por Hertz

I_a - corrente eficaz no enrolamento auxiliar

I_c - corrente em C_c

I_{ca} - corrente em R_{ca}

I_{e1} - corrente em C_{e1}

I_{e2} - corrente em C_{e2}

I_{ec} - corrente em R_{ec}

I_{ef} - corrente em R_{ef}

I_f - corrente em C_f

I_{fa} - corrente em R_{fa}

I_m - corrente eficaz do enrolamento principal

I_p - corrente fornecida por P

I_{p1} - corrente fornecida por P_1

I_{p2} - corrente fornecida por P_2

K_F - Taxas de distribuição da capacidade de refrigeração para o congelador

K_p - Taxas de distribuição da capacidade de refrigeração para o gabinete de refrigeração

N_a - número de espiras do enrolamento auxiliar

N_m - número de espiras do enrolamento principal

P_1 - fonte de corrente de alimentação principal parcial circuito 01

P_2 - fonte de corrente de alimentação principal parcial circuito 02

P - fonte de corrente principal que alimenta todo o sistema

P_a - fonte de corrente de interferência

$P_{1(REG)}$ - parcela da potência elétrica total fornecida ao gabinete de refrigeração

$P_{2(REG)}$ - parcela da potência elétrica total fornecida ao congelador

P_{REG} - potência elétrica total fornecida ao circuito elétrico em regime contínuo e permanente

q - Capacidade de refrigeração

R_{1m} - resistência de enrolamento do estator

R_2 - resistência do rotor

R_b - resistência inversa

R_{ca} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_c e V_a

R_{ec} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_e e V_c

R_{ef} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_e e V_f

R_f - resistência direta

R_{fa} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_f e V_a

T - conjugado desenvolvido pelo motor de indução monofásico

T_a - temperatura ambiente

T_c - temperatura do ar no gabinete de refrigeração

$TCH2$ - temperatura indicada no canal 2

$TCH3$ - temperatura indicada no canal 3

$TCH4$ - temperatura indicada no canal 4

$TCH5$ - temperatura indicada no canal 5

T_e - temperatura na parede do evaporador

T_f - temperatura do ar no congelador

U_1 - tensão de alimentação aplicada ao motor de indução monofásico

U_a - tensão no enrolamento auxiliar

U_{CH2} - tensão gerada no canal 2

U_{CH3} - tensão gerada no canal 3

U_{CH4} - tensão gerada no canal 4

U_{CH5} - tensão gerada no canal 5

U_n - tensão nominal

V_m - tensão no enrolamento principal

V_a - Tensão no ponto a

V_c - Tensão no ponto c

V_e - Tensão no ponto e

V_f - Tensão no ponto f

W_N - Potência elétrica de alimentação

x - Temperatura do ar no congelador

X_{1m} - reatância de dispersão do estator

X_2 - reatância de dispersão do rotor

X_b - reatância de dispersão inversa

X_c - reatância de dispersão do capacitor de partida

X_f - reatância de dispersão direta

X_m - reatância de magnetização

y - Temperatura do ar no gabinete de refrigeração

Z_b - impedância inversa do motor de indução monofásico

Z_c - impedância do capacitor de partida

Z_f - impedância direta do motor de indução monofásico

β_c - percentual de corrente do circuito da fonte P1 em relação à P

β_f - percentual de corrente do circuito da fonte P2 em relação à P

θ_a - ângulo de fase da corrente do enrolamento auxiliar

θ_m - ângulo de fase da corrente do enrolamento principal

μ_F - Calor por unidade de tempo adicionada ao congelador [J/s]

μ_p - Calor por unidade de tempo adicionada ao gabinete de refrigeração [J/s]

ω_e - frequência angular aplicada ao motor de indução monofásico

ω_n - frequência angular nominal

RESUMO

Apresenta-se o modelamento matemático do comportamento térmico de um refrigerador doméstico através de funções de transferência, utilizando a analogia de um sistema térmico convertido para um sistema elétrico simplificado. Obtidos experimentalmente os pontos das curvas de temperatura no evaporador, congelador e gabinete de refrigeração, determinam-se os coeficientes das funções de transferência que, devidamente aplicados às equações diferenciais de 2º ordem, permite simular o comportamento térmico de um refrigerador doméstico de forma simples e rápida.

ABSTRACT

In this paper the mathematical modeling of the thermal behavior of a domestic refrigerator is proposed through transfer functions, using the analogy of a thermal system converted for a simplified electric system. Obtained the points of the curves of temperature of the evaporator, freezer and internal compartment experimentally, they are determined the coefficients of the transfer functions that, properly applied to the second-order differential equation, it allows to simulate the thermal behavior of a domestic refrigerator in a simple and fast way.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução

Ao longo do tempo os refrigeradores domésticos tornaram um dos eletrodomésticos mais indispensáveis, principalmente nas aplicações de conservação de alimentos. Estes equipamentos são responsáveis por grande parte do consumo de energia em uma residência. Portanto é de extrema importância o controle do sistema de refrigeração sob o ponto de vista da qualidade como de uso racional de energia.

Neste sistema utiliza-se o método de controle convencional LIGA (ON) – DESLIGA (OFF). Uma das técnicas que pode ser utilizada para controlar um sistema de refrigeração é a que usa o acionamento do sistema motor-compressor com velocidade variável. Esta técnica proporciona uma diminuição no consumo de energia em relação ao sistema de controle convencional ON-OFF e permite que o sistema de refrigeração opere com temperatura constante.

A análise de um sistema de refrigeração normalmente é complexa, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Uma das formas para estudar e analisar estes sistemas é a utilização de modelos matemáticos para representar o comportamento do sistema.

Trabalhos recentes sobre comportamento térmico de refrigeradores domésticos têm utilizado as equações térmicas clássicas, com inúmeras variáveis e com complexas deduções, utilizando-se parâmetros relativos à dinâmica térmica, conforme são apresentados nas propostas de [5] e [17].

Existem dois tipos de modelos, um para análise do sistema em regime permanente e outro para análise em regime transitório. Estes modelos estão baseados na formulação modular das partes que constituem o sistema de refrigeração (evaporador, condensador, compressor, etc).

O sistema de equações que compõem um modelo matemático representa uma aproximação do modelo físico, uma vez que o modelo matemático não pode incorporar todas as características do sistema físico.

A resposta temporal das variáveis de interesse de um modelo, pode ser obtida por simulação computacional, excitando-se as variáveis de entrada com sinais desejados e definindo os valores das condições iniciais das variáveis dependentes [9].

Para a utilização dos modelos matemáticos convencionais é necessário o conhecimento dos parâmetros das várias partes do processo, os quais usualmente são difíceis de serem obtidos.

Os modelos matemáticos possuem diversas vantagens sobre os empíricos: eles freqüentemente podem ser extrapolados sobre uma faixa maior de condições operacionais, além de permitirem inferir os valores de variáveis de processo não-medidas ou incomensuráveis [9].

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático simplificado para representar o comportamento térmico e elétrico de um refrigerador doméstico. Este modelo será utilizado para analisar o comportamento do sistema motor-compressor, quando este for acionado com velocidade variável.

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho está baseado na semelhança das equações que regem o comportamento térmico do sistema de refrigeração e das equações que mostram o comportamento de um circuito elétrico do tipo RC, alimentado por uma fonte de corrente.

A simplicidade do modelo esta baseada no fato de que não serão necessários determinar os parâmetros térmicos do sistema de refrigeração, nem mesmo os parâmetros do circuito elétrico análogo que será utilizado para a obtenção do sistema de equações.

Os coeficientes das equações que compõem o modelo serão obtidos a partir dos dados da operação do sistema, ou seja, das curvas de temperaturas dos compartimentos do refrigerador e da potência elétrica consumida.

O comportamento térmico do refrigerador está diretamente associado ao funcionamento do compressor, o qual é acionado por um motor de indução monofásico com capacitor de partida. Desta forma o modelo do motor será incorporado ao modelo matemático do sistema.

A validação do modelo proposto será feita através da comparação entre os resultados obtidos com o modelo matemático simplificado e os resultados experimentais.

A determinação dos coeficientes das equações será feita a partir das curvas obtidas nos ensaios experimentais, utilizando-se o método dos mínimos quadrados e funções pré-definidas do software MATLAB™.

1.2 – Organização da dissertação

O trabalho está apresentado em 8 capítulos, distribuídos:

O capítulo 2 equacionamento para um circuito elétrico análogo a um sistema térmico, a partir do qual será obtido o conjunto de equações para representar o comportamento real do processo.

No capítulo 3 as equações do modelo do motor de indução monofásico com capacitor de partida e suas características.

No capítulo 4 um resumo do programa principal e das sub-rotinas para simulação das equações do modelo matemático simplificado e do motor de indução.

No capítulo 5 os ensaios realizados com o refrigerador e apresentados os resultados experimentais obtidos.

No capítulo 6 os resultados das simulações e as análises da comparação destes com os resultados experimentais.

No capítulo 7 as simulações e análise dos resultados para variação de velocidade do motor de indução.

O capítulo 8 as conclusões finais deste trabalho e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

1.3 – Sistema de refrigeração

O ciclo de refrigeração básico compreende quatro processos: compressão, condensação, expansão e evaporação [13].

Os respectivos componentes que realizam trabalho em cada processo são: compressor, condensador, tubo capilar ou válvula de expansão e evaporador.

O compressor é responsável pela circulação do fluido refrigerante pelo sistema. Basicamente, o compressor possui uma entrada (sucção) e uma saída (descarga) de gás. Para sistemas de refrigeração, em específico para refrigeradores domésticos, pode-se usar como fluido refrigerante o R12 (mais utilizado) ou o R134a ou ainda o R600a.

O compressor eleva a pressão do gás aspirado na sucção e envia ao condensador, à temperatura ambiente, para liquefação do mesmo, sob alta pressão.

Após a liquefação o fluido refrigerante que estava no condensador, segue para um componente de expansão, tubo capilar ou válvula de expansão, aos quais reduz a pressão do refrigerante líquido e, em consequência, a queda da temperatura do refrigerador, para em seguida ser aspirado pelo compressor.

Na mudança do estado líquido para o gasoso, é retirado calor do interior do refrigerador. O tubo capilar oferece resistência à circulação do refrigerante, separando o ponto de alta pressão (condensador) do ponto de baixa pressão (evaporador) [14].

A seguir, é apresentado na figura 1, o ciclo de refrigeração de um refrigerador doméstico.

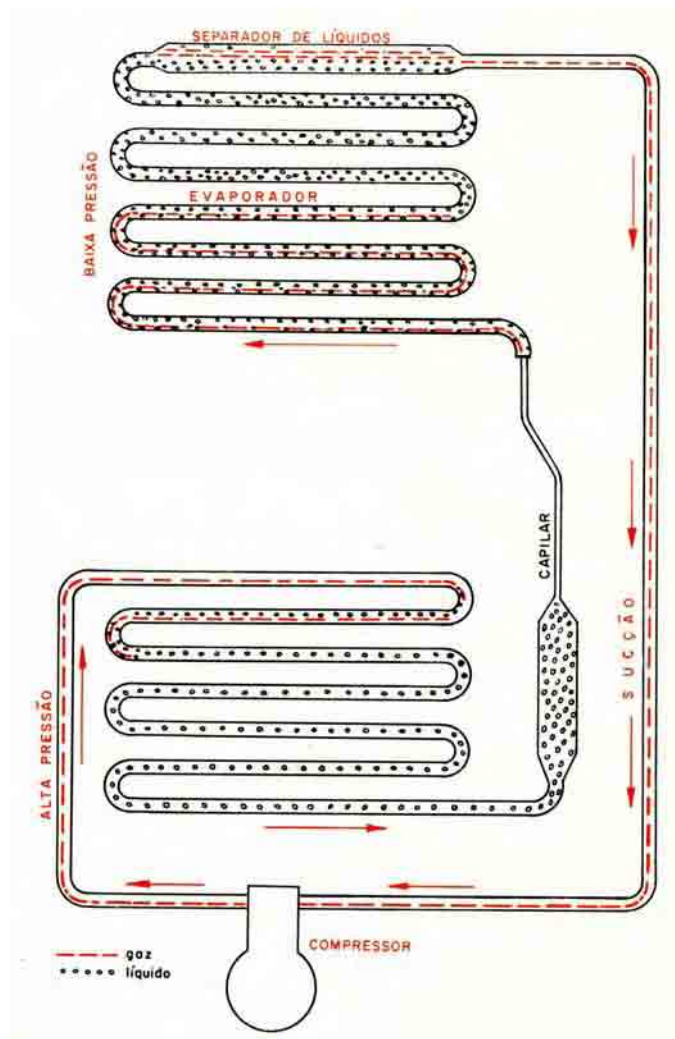


Figura 1 - Ciclo de refrigeração de um refrigerador [14]

Para circuitos que utilizam tubo capilar, ocorre uma equalização das pressões de sucção e descarga durante a parada do compressor, proporcionando um baixo torque de partida para o motor do compressor. Isso permite que sejam usados motores de pequena potência, geralmente, fracionários, utilizando-se de métodos de partida direta.

A temperatura de evaporação interfere diretamente no trabalho realizado pelo motor num compressor sendo que, quanto mais baixa a temperatura de evaporação o trabalho será maior. Este critério é utilizado para o dimensionamento correto do motor para o refrigerador.

De acordo com o tipo de aplicação, utilizam-se motores adequadamente dimensionados conforme a pressão de retorno do evaporador: alta pressão de retorno (HBP – High Back Pressure), média pressão de retorno (MBP – Medium Back Pressure) ou Baixa pressão de retorno (LBP – Low Back Pressure).

CAPÍTULO 2

ANALOGIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE UM CIRCUITO ELÉTRICO E DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

2.1 – Introdução

A literatura tem mostrado modelos mais sofisticados e precisos para análise do comportamento da temperatura das partes de um refrigerador doméstico. Entretanto, tais modelos exigem conhecimento de características específicas do projeto térmico, os quais, em geral, não são fornecidos pelos fabricantes.

Em alguns estudos de engenharia, se faz necessário simplificar as equações usadas para descrever o comportamento do sistema observado, utilizando-se de métodos matemáticos conhecidos.

Neste capítulo será desenvolvido o equacionamento matemático do circuito elétrico do tipo RC alimentado por fonte de corrente para ser comparado, por semelhança, com as equações térmicas.

2.2 – Sistema de refrigeração

As equações do modelo matemático que representam um sistema de refrigeração, proposto neste trabalho, estão baseadas na analogia existente entre o comportamento térmico do refrigerador doméstico e o comportamento de um circuito elétrico do tipo RC, alimentado por uma fonte de corrente.

As equações que compõem o modelo matemático para obtenção das temperaturas do ar no congelador do ar no gabinete de refrigeração de um refrigerador doméstico são [17]:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha_2 \cdot \frac{dx}{dt} + \alpha_1 \cdot x = -\beta \cdot q + \alpha \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \alpha_{2P} \cdot \frac{dy}{dt} + \alpha_{1P} \cdot y = -\beta_P \cdot q + \alpha_P \quad (2.2)$$

$$W_N = \mu_1 \cdot r + \mu_2 \cdot r_P + \mu_3 \quad (2.3)$$

onde:

x - Temperatura do ar no congelador

y - Temperatura do ar no gabinete de refrigeração

W_N - Potência elétrica de alimentação

q - Capacidade de refrigeração

Das equações das temperaturas do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, tem-se:

$$\beta = \beta_F \cdot K_F \quad (2.4)$$

$$\beta_P = \beta_P \cdot K_P \quad (2.5)$$

$$\alpha = \beta_F \cdot (\mu_F + b_F \cdot \theta_R) \quad (2.6)$$

$$\alpha_P = \beta_P \cdot (\mu_P + b_P \cdot \theta_R) \quad (2.7)$$

onde os parâmetros α_2 , α_1 , α_{2P} , α_{1P} , β_F e β_P são obtidos pelo método dos mínimos quadrados usando os dados do ensaio de regime contínuo.

Tem-se ainda:

K_F, K_P - Taxas de distribuição da capacidade de refrigeração para o congelador e gabinete de refrigeração, respectivamente.

μ_F, μ_P - Calor por unidade de tempo adicionada ao congelador e gabinete de refrigeração, respectivamente [J/s].

b_F, b_P - Transmitância térmica global do congelador e gabinete de refrigeração [J/s.°C].

2.3 – Circuito elétrico com fonte de corrente parcial P1

A seguir apresenta-se o circuito elétrico do tipo RC alimentado por fonte de corrente.

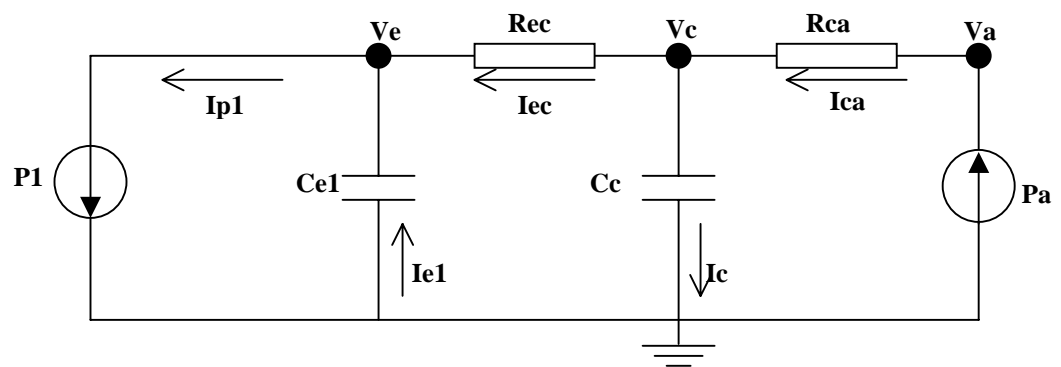


Figura 2 – Circuito elétrico do tipo RC com fonte de corrente parcial P1

As componentes do circuito elétrico são:

P_1 - fonte de corrente de alimentação principal parcial

P_a - fonte de corrente de interferência

C_{e1} - capacitância de regulação de tensão do nó V_e

C_c - capacitância de regulação de tensão do nó V_c

R_{ec} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_e e V_c

R_{ca} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_c e V_a

tem-se ainda:

I_{e1} - corrente em C_{e1}

I_{ec} - corrente em R_{ec}

I_c - corrente em C_c

I_{ca} - corrente em R_{ca}

I_{P1} - corrente fornecida por P_1

I_P - corrente fornecida por P

P - fonte de corrente principal que alimenta todo o sistema

β_c - percentual de corrente do circuito da fonte P1 em relação à P

2.3.1 – Determinação da equação da tensão em V_e

Considerando as condutâncias referente às resistências de dissipação R_{ec} e R_{ca} , têm-se:

$$G_{ec} = \frac{1}{R_{ec}}$$

$$G_{ca} = \frac{1}{R_{ca}}$$

Do circuito elétrico na Figura 2, tem-se:

$$I_{P1} = \beta_c \cdot I_P \quad (2.8)$$

$$\text{Nó 1: } I_{P1} = I_{e1} + I_{ec} \quad (2.9)$$

$$\text{Nó 2: } I_{ca} = I_c + I_{ec} \quad (2.10)$$

$$I_{e1} = C_{e1} \cdot \frac{dV_e}{dt} \quad (2.11)$$

$$I_{ec} = G_{ec} \cdot (V_c - V_e) \quad (2.12)$$

$$I_c = C_c \cdot \frac{dV_c}{dt} \quad (2.13)$$

$$I_{ca} = G_{ca} \cdot (V_a - V_c) \quad (2.14)$$

substituindo (2.11) e (2.12) em (2.9), tem-se:

$$I_{p1} = C_{e1} \cdot \frac{dV_e}{dt} + G_{ec} \cdot (V_c - V_e) \quad (2.15)$$

isolando $\frac{dV_e}{dt}$, tem-se:

$$\frac{dV_e}{dt} = \frac{I_{p1} - G_{ec} \cdot (V_c - V_e)}{C_{e1}} \quad (2.16)$$

$$\frac{dV_e}{dt} = \frac{I_{p1}}{C_{e1}} - \frac{G_{ec}}{C_{e1}} \cdot V_c + \frac{G_{ec}}{C_{e1}} \cdot V_e \quad (2.17)$$

substituindo (2.12) (2.13) e (2.14) em (2.10), e isolando $\frac{dV_c}{dt}$ tem-se:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{G_{ca} \cdot (V_a - V_c) - G_{ec} \cdot (V_c - V_e)}{C_c} \quad (2.18)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{G_{ca}}{C_c} \cdot V_a - \frac{(G_{ca} + G_{ec})}{C_c} \cdot V_c + \frac{G_{ec}}{C_c} \cdot V_e \quad (2.19)$$

adotando-se:

$$X_{1(c)} = \frac{G_{ec}}{C_{e1}} \quad (2.20)$$

$$X_{2(c)} = \frac{G_{ca}}{C_c} \quad (2.21)$$

$$X_{3(c)} = \frac{(G_{ca} + G_{ec})}{C_c} \quad (2.22)$$

$$X_{4(c)} = \frac{G_{ec}}{C_c} \quad (2.23)$$

aplicando a transformada de Laplace em (2.17) e (2.19), tem-se:

$$s.V_c = X_{2(c)}.V_a - X_{3(c)}.V_c + X_{4(c)}.V_e \quad (2.24)$$

$$s.V_e = \frac{I_{p1}}{C_{e1}} - X_{1(c)}.V_c + X_{1(c)}.V_e \quad (2.25)$$

isolando V_c em (2.24)

$$V_c = \frac{(X_{2(c)}.V_a + X_{4(c)}.V_e)}{(s + X_{3(c)})} \quad (2.26)$$

substituindo (2.26) em (2.25), tem-se:

$$V_e = \frac{\frac{I_{P1}}{C_{e1}} \cdot (s + X_{3(c)}) - X_{1(c)} \cdot X_{2(c)} \cdot V_a}{(s - X_{1(c)}) \cdot (s + X_{3(c)}) + X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}} \quad (2.27)$$

resolvendo o denominador de (2.27):

$$s^2 - (X_{1(c)} - X_{3(c)}) \cdot s - (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}) = 0 \quad (2.28)$$

A solução desta equação é dada por s_1 e s_2 :

$$s_1 = \frac{(X_{1(c)} - X_{3(c)}) + \sqrt{(X_{1(c)} - X_{3(c)})^2 + 4 \cdot (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)})}}{2} \quad (2.29)$$

$$s_2 = \frac{(X_{1(c)} - X_{3(c)}) - \sqrt{(X_{1(c)} - X_{3(c)})^2 + 4 \cdot (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)})}}{2} \quad (2.30)$$

substituindo (2.28) em (2.27), tem-se:

$$\begin{aligned} s^2 \cdot V_e - (X_{1(c)} - X_{3(c)}) \cdot s \cdot V_e - (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}) \cdot V_e &= \\ = s \cdot \frac{I_{P1}}{C_{e1}} + \frac{X_{3(c)}}{C_{e1}} \cdot I_{P1} - X_{1(c)} \cdot X_{2(c)} \cdot V_a & \end{aligned} \quad (2.31)$$

adotando:

$$K_{1(c)} = X_{1(c)} - X_{3(c)} \quad (2.32)$$

$$K_{2(c)} = (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}) \quad (2.33)$$

$$K_{3(c)} = \frac{X_{3(c)}}{C_{e1}} \quad (2.34)$$

$$K_{4(c)} = (X_{1(c)} \cdot X_{2(c)}) \quad (2.35)$$

tem-se:

$$\frac{d^2 V_e}{dt^2} = K_{1(c)} \cdot \frac{dV_e}{dt} + K_{2(c)} \cdot V_e + \frac{1}{C_{e1}} \cdot \frac{dI_{P1}}{dt} + K_{3(c)} \cdot I_{P1} - K_{4(c)} \cdot V_a \quad (2.36)$$

Sendo (2.36) uma equação diferencial ordinária de 2º ordem, é definida sua solução:

$$V_e = V_{e(N)} + V_{e(F)} \quad (2.37)$$

onde:

$$V_{e(N)} = A_1 \cdot e^{s_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{s_2 \cdot t} \quad (2.38)$$

é a resposta natural.

Em regime permanente, aplicado em (2.36), tem-se $\frac{dV_e}{dt} = 0$,
obtém-se $V_{e(F)}$ (resposta forçada).

$$V_{e(F)} = -\frac{K_{3(c)}}{K_{2(c)}} \cdot I_{P1} + \frac{K_{4(c)}}{K_{2(c)}} \cdot V_a \quad (2.39)$$

adotando $A_3 = V_{e(F)}$, tem-se:

$$V_e(t) = A_1 \cdot e^{s_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{s_2 \cdot t} + A_3 \quad (2.40)$$

Resolvendo a equação (2.40) através do método dos mínimos quadrados, utilizando o MATLAB™, obtém-se as coeficientes $A_{1(RC)}$, $A_{2(RC)}$, $A_{3(RC)}$, s_1 e s_2 referentes aos coeficientes da curva de ensaio de Regime Contínuo (RC).

2.3.2 – Determinação da equação da tensão em V_c

Isolando V_e em (2.25), tem-se:

$$V_e = \frac{\frac{I_{P1}}{C_{e1}} - X_{1(c)} \cdot V_c}{(s - X_{1(c)})} \quad (2.41)$$

substituindo (2.41) em (2.24), tem-se:

$$V_c = \frac{\frac{X_{4(c)}}{C_{e1}} \cdot I_{P1} + (s - X_{1(c)}) \cdot X_{2(c)} \cdot V_a}{(s - X_{1(c)}) \cdot (s + X_{3(c)}) + X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}} \quad (2.42)$$

resolvendo o denominador de (2.42), tem-se:

$$s^2 - (X_{1(c)} - X_{3(c)}) \cdot s - (X_{1(c)} \cdot X_{3(c)} - X_{1(c)} \cdot X_{4(c)}) = 0 \quad (2.43)$$

A solução desta equação é dada por s_4 e s_5 :

$$s_4 = \frac{(X_{1(c)} - X_{3(c)}) + \sqrt{(X_{1(c)} - X_{3(c)})^2 + 4.(X_{1(c)}.X_{3(c)} - X_{1(c)}.X_{4(c)})}}{2} \quad (2.44)$$

$$s_5 = \frac{(X_{1(c)} - X_{3(c)}) - \sqrt{(X_{1(c)} - X_{3(c)})^2 + 4.(X_{1(c)}.X_{3(c)} - X_{1(c)}.X_{4(c)})}}{2} \quad (2.45)$$

adotando:

$$K_{5(c)} = \frac{X_{4(c)}}{C_{e1}} \quad (2.46)$$

re-escrevendo (2.42) e isolando $\frac{d^2V_c}{dt^2}$, tem-se:

$$\frac{d^2V_c}{dt^2} = K_{1(c)} \cdot \frac{dV_c}{dt} + K_{2(c)} \cdot V_c + K_{5(c)} \cdot I_{P1} - K_{4(c)} \cdot V_a \quad (2.47)$$

Sendo (2.47) uma equação diferencial ordinária de 2º ordem, é definida sua solução como:

$$V_c = V_{c(N)} + V_{c(F)} \quad (2.48)$$

onde:

$$V_{c(N)} = A_4 \cdot e^{s_4 \cdot t} + A_5 \cdot e^{s_5 \cdot t} \quad (2.49)$$

é a resposta natural.

Em regime permanente, aplicado em (2.47), tem-se $\frac{dV_c}{dt} = 0$,
obtém-se $V_{c(F)}$ (resposta forçada).

$$V_{c(F)} = -\frac{K_{5(c)}}{K_{2(c)}}.I_{P1} + \frac{K_{4(c)}}{K_{2(c)}}.V_a \quad (2.50)$$

adotando $A_6 = V_{c(F)}$, tem-se:

$$V_c(t) = A_4.e^{s_4.t} + A_5.e^{s_5.t} + A_6 \quad (2.51)$$

Resolvendo a equação (2.51) através do método dos mínimos quadrados, utilizando o MATLAB™ obtém-se os coeficientes $A_{4(RC)}$, $A_{5(RC)}$, $A_{6(RC)}$, s_4 e s_5 referentes aos coeficientes da curva de ensaio de regime contínuo.

2.4 – Circuito elétrico com fonte de corrente parcial P2

A seguir será apresentado o circuito elétrico do tipo RC alimentado por fonte de corrente.

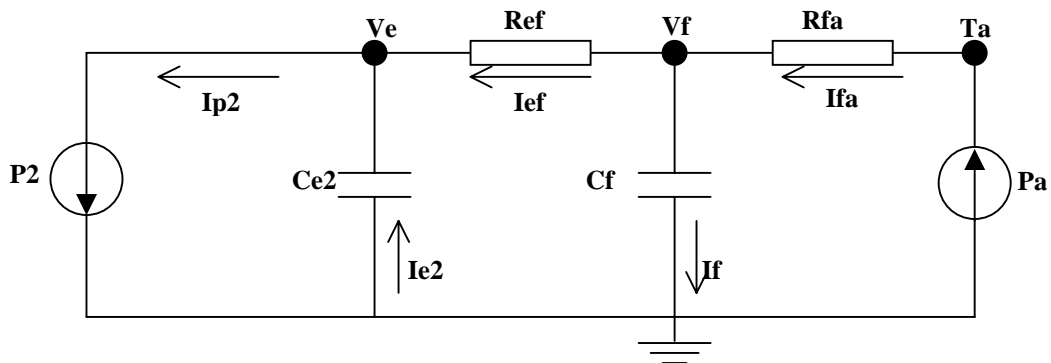


Figura 3 – Circuito elétrico do tipo RC alimentado por fonte de corrente parcial P2

As componentes do circuito elétrico são:

P_2 - fonte de corrente de alimentação principal parcial

P_a - fonte de corrente de interferência

C_{e2} - capacitância de regulação de tensão do nó V_e

C_f - capacitância de regulação de tensão do nó V_f

R_{ef} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_e e V_f

R_{fa} - resistência de dissipação entre os pontos de tensão V_f e V_a

tem-se ainda:

I_{e2} - corrente em C_{e2}

I_{ef} - corrente em R_{ef}

I_f - corrente em C_f

I_{fa} - corrente em R_{fa}

I_{P_2} - corrente fornecida por P_2

I_p - corrente fornecida por P

P - fonte de corrente principal que alimenta todo o sistema

β_f - percentual de corrente do circuito da fonte P2 em relação à P

Utilizando o desenvolvimento matemático apresentado nos sub-capítulos 2.31 e 2.32, aplicando as nomenclaturas do sub-capítulo 2.4, obtêm-se:

$$V_f(t) = A_7 \cdot e^{s_7 \cdot t} + A_8 \cdot e^{s_8 \cdot t} + A_9 \quad (2.52)$$

Resolvendo a equação (2.52) através do método dos mínimos quadrados, utilizando o MATLAB™, obtêm-se as coeficientes $A_{7(RC)}$, $A_{8(RC)}$, $A_{9(RC)}$, s_7 e s_8 referentes aos coeficientes da curva de ensaio de regime contínuo.

2.5 – Análise por semelhança entre as equações térmicas e as equações desenvolvidas a partir do equacionamento do circuito elétrico RC com fonte de corrente.

Comparando a equação que descrevem o comportamento térmico do refrigerador doméstico com as equações obtidas pelo equacionamento dos circuitos elétricos do tipo RC alimentado por fonte de corrente, observa-se que existe semelhança entre ambas.

Por semelhança, tem-se:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \alpha_{2P} \cdot \frac{dy}{dt} + \alpha_{1P} \cdot y = -\beta_P \cdot q + \alpha_P \quad \simeq \quad \frac{d^2 V_c}{dt^2} - K_{1(c)} \cdot \frac{dV_c}{dt} - K_{2(c)} \cdot V_c = K_{5(c)} \cdot I_{P1} - K_{4(c)} \cdot V_a$$

Considerando que a tensão V_a seja constante, pode-se igualar os coeficientes:

$$y = V_c$$

$$\alpha_{2P} = -K_{1(c)}$$

$$\alpha_{1P} = -K_{2(c)}$$

$$\beta_P \cdot q = -K_{5(c)} \cdot I_{P1}$$

$$\alpha_P = -K_{4(c)} \cdot V_a$$

Por semelhança, tem-se:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha_2 \cdot \frac{dx}{dt} + \alpha_1 \cdot x = -\beta \cdot q + \alpha \quad \simeq \quad \frac{d^2 V_f}{dt^2} - K_{1(f)} \cdot \frac{dV_f}{dt} - K_{2(f)} \cdot V_f = K_{5(f)} \cdot I_{P2} - K_{4(f)} \cdot V_a$$

Como a tensão V_a é constante, pode-se igualar os coeficientes:

$$x = V_f$$

$$\alpha_2 = -K_{1(f)}$$

$$\alpha_1 = -K_{2(f)}$$

$$\beta \cdot q = -K_{5(f)} \cdot I_{P2}$$

$$\alpha = -K_{4(f)} \cdot V_a$$

Dessa forma, conclui-se que as equações desenvolvidas a partir do equacionamento do circuito elétrico proposto podem ser utilizadas para representar o comportamento das temperaturas na parede do evaporador, no congelador e no gabinete de refrigeração.

As variáveis podem ser denominadas:

$$T_c = V_c \text{ - temperatura do ar no gabinete de refrigeração}$$

$$T_f = V_f \text{ - temperatura do ar no congelador}$$

e a constante

$$T_a = V_a \text{ - temperatura ambiente}$$

As equações desenvolvidas 2.51 e 2.52 podem ser re-escritas:

$$T_c(t) = A_4 \cdot e^{s_4 \cdot t} + A_5 \cdot e^{s_5 \cdot t} + A_6$$

$$T_f(t) = A_7 \cdot e^{s_7 \cdot t} + A_8 \cdot e^{s_8 \cdot t} + A_9$$

Como as temperaturas do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração são diretamente proporcionais à temperatura nas paredes do evaporador, nas condições de regime contínuo, portas fechadas e sem alimentos em seu interior, a equação da tensão V_e pode ser utilizada para representar o comportamento da temperatura na parede do evaporador.

$$\frac{d^2V_e}{dt^2} - K_{1(f)} \cdot \frac{dV_e}{dt} - K_{2(f)} \cdot V_e = \frac{1}{C_{e2}} \cdot \frac{dI_{p2}}{dt} + K_{3(f)} \cdot I_{p2} - K_{4(f)} \cdot V_a$$

Denomina-se:

$T_e = V_e$ - temperatura na parede do evaporador

A equação desenvolvida 2.40 pode ser re-escrita:

$$T_e(t) = A_1 \cdot e^{s_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{s_2 \cdot t} + A_3$$

2.6 – Determinação dos coeficientes em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

No item, será determinada a relação entre os coeficientes da equação simplificada e a variação da potência elétrica de alimentação do motor de indução monofásico.

Sendo a corrente fornecida ao circuito elétrico pela fonte P_1 , em regime contínuo e permanente :

$$I_{P1(REG)} = \beta_f \cdot I_{P(REG)}$$

tem-se:

$$P_{1(REG)} = I_{P1(REG)} \cdot V_{e1(REG)}$$

portanto:

$$P_{1(REG)} = \beta_c \cdot P_{REG}$$

onde P_{REG} é a potência elétrica total fornecida ao circuito elétrico em regime contínuo e permanente e $P_{1(REG)}$ é a parcela da potência elétrica total fornecida ao gabinete de refrigeração. Por analogia, P_{REG} representa a potência elétrica do motor de indução no refrigerador.

2.6.1 – Determinação do coeficiente $A_3 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando:

$$a_{3(c)} = -\frac{K_{3(c)}}{K_{2(c)}} \quad (2.53)$$

e

$$b_{3(c)} = \frac{K_{4(c)}}{K_{2(c)}} \quad (2.54)$$

Simplificando a equação (2.39), tem-se:

$$A_3 = a_{3(c)} \cdot P_1 + b_{3(c)} \cdot T_a$$

Para determinação de $a_{3(c)}$ e $b_{3(c)}$, tem-se duas condições:

$$P_1 = 0 \rightarrow A_{3(RC)} = T_a$$

$$t = \infty \rightarrow P_1 = \beta_c \cdot P_{REG(RC)}$$

Dessa forma, tem-se:

$$b_{3(c)} = 1$$

$$A_{3(RC)} = a_{3(c)} \cdot \beta_c \cdot P_{REG(RC)} + b_{3(c)} \cdot T_a \quad (2.55)$$

isolando $a_{3(c)}$, tem-se:

$$a_{3(c)} = \frac{A_{3(RC)} - T_a}{\beta_c \cdot P_{REG(RC)}} \quad (2.56)$$

Assim, obtêm-se A_3 .

$$A_3 = \left(\frac{A_{3(RC)} - T_a}{P_{REG(RC)}} \right) \cdot P_{REG(2)} + T_a \quad (2.57)$$

2.6.2 – Determinação do coeficiente $A_1 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Derivando (2.40) em $t = 0$, tem-se:

$$\frac{dT_e(0)}{dt} = A_1 \cdot s_1 + A_2 \cdot s_2 \quad (2.58)$$

Em $t=0$ para (2.58) e igualando-a com (2.25), tem-se:

$$\frac{P_1}{C_{e1}} - (T_c(0) - T_e(0)) \cdot X_{1(c)} = A_1 \cdot s_1 + A_2 \cdot s_2 \quad (2.59)$$

Em $t = 0$ para (2.40) e isolando A_2 , obtêm-se:

$$A_2 = T_e(0) - A_3 - A_1 \quad (2.60)$$

substituindo (2.60) em (2.59), tem-se:

$$A_1 = \frac{P_1(0) / C_{e1} - X_{1(c)} \cdot (T_c(0) - T_e(0)) - s_2 \cdot (T_e(0) - A_3)}{(s_1 - s_2)} \quad (2.61)$$

aplicando (2.61) em (2.60), obtém-se A_2 .

Considerando em $t = 0$, $T_c(0) = T_e(0) = T_a$ e isolando C_{e1} , tem-se:

$$C_{e1} = \frac{P_1(0)}{A_1 \cdot (s_1 - s_2) + s_2 \cdot (T_e(0) - A_3)} \quad (2.62)$$

A equação da potência elétrica em $t=0$ pode ser escrita:

$$P_1(0) = G_1 \cdot T_c(0) + G_2 \cdot T_f(0) + G_3 \quad (2.63)$$

Considerando que $T_c(0) = T_f(0) = T_a$, pode-se escrever a equação:

$$P_1(0) = G_1 \cdot T_a + G_2 \cdot T_a + G_3 \quad (2.64)$$

Considerando $t = 0$ e $T_c(0) = T_e(0) = T_a, (0)$ e $A_3 = f(\Delta P_{REG})$ pode-se re-escrever (2.61):

$$A_1 = \frac{\frac{\beta_c}{C_{el}} \cdot P(0) - s_2 \cdot (T_a - A_3)}{(s_1 - s_2)} \quad (2.65)$$

2.6.3 – Determinação do coeficiente $A_2 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura na parede do evaporador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando $t=0$, $T_c(0) = T_e(0) = T_a$, $A_1 = f(\Delta P_{REG})$, pode-se re-escrever (2.60):

$$A_2 = T_a - A_3 - A_1 \quad (2.66)$$

2.6.4 – Determinação do coeficiente $A_6 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando:

$$a_6 = -\frac{K_{5(c)}}{K_{2(c)}} \quad (2.67)$$

e

$$b_6 = \frac{K_{4(c)}}{K_{2(c)}} \quad (2.68)$$

Simplificando a equação (2.50), tem-se:

$$A_6 = a_6 \cdot P_1 + b_6 \cdot T_a \quad (2.69)$$

Para determinação de $a_{6(c)}$ e $b_{6(c)}$, tem-se duas condições:

$$P_1 = 0 \longrightarrow A_{6(RC)} = T_a$$

$$t = \infty \longrightarrow P_1 = \beta_c \cdot P_{REG(RC)}$$

Dessa forma, tem-se:

$$b_6 = 1$$

$$A_{6(RC)} = a_6 \cdot \beta_c \cdot P_{REG(RC)} + b_6 \cdot T_a \quad (2.70)$$

isolando a_6 , tem-se:

$$a_6 = \frac{A_{6(RC)} - T_a}{\beta_c \cdot P_{REG(RC)}} \quad (2.71)$$

Assim, obtêm-se A_6 :

$$A_6 = \left(\frac{A_{6(RC)} - T_a}{\beta_c \cdot P_{REG(RC)}} \right) \cdot P_{REG(2)} + T_a \quad (2.72)$$

2.6.5 – Determinação do coeficiente $A_5 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Derivando (2.51) em $t = 0$, tem-se:

$$\frac{dT_c(0)}{dt} = A_4 \cdot s_4 + A_5 \cdot s_5 \quad (2.73)$$

Em $t=0$ para (2.19), obtêm-se:

$$\frac{dT_c(0)}{dt} = (X_{2(c)} - X_{3(c)} + X_{4(c)}) \cdot T_a \quad (2.74)$$

Considerando:

$$K_{6(c)} = (X_{2(c)} - X_{3(c)} + X_{4(c)}) \quad (2.75)$$

e igualando (2.73) e (2.74), obtêm-se:

$$K_{6(c)} = \frac{A_{4(RC)} \cdot s_4 + A_{5(RC)} \cdot s_5}{T_a} \quad (2.76)$$

Dessa forma, tem-se:

$$A_4 \cdot s_4 + A_5 \cdot s_5 = K_{6(c)} \cdot T_a \quad (2.77)$$

Em $t = 0$ para (2.51) e isolando A_4 , tem-se:

$$A_4 = T_c(0) - A_6 - A_5 \quad (2.78)$$

Considerando $t = 0$, $T_c(0) = T_a$, $A_6 = f(\Delta P_{REG})$ e substituindo (2.78) em (2.77), tem-se:

$$A_5 = \frac{K_{6(c)} T_a + s_4 (A_6 - T_a)}{(s_5 - s_4)} \quad (2.79)$$

2.6.6 – Determinação do coeficiente $A_4 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no gabinete de refrigeração em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando $t=0$, $T_c(0) = T_a$, $A_5 = f(\Delta P_{REG})$, pode-se reescrever (2.78):

$$A_4 = T_a - A_6 - A_5 \quad (2.80)$$

2.6.7 – Determinação do coeficiente $A_9 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando:

$$a_9 = -\frac{K_{5(f)}}{K_{2(f)}} \quad (2.81)$$

e

$$b_9 = \frac{K_{4(f)}}{K_{2(f)}} \quad (2.82)$$

tem-se:

$$A_9 = a_9 \cdot P_2 + b_9 \cdot T_a \quad (2.83)$$

Para determinação de a_9 e b_9 , tem-se duas condições:

$$P_2 = 0 \longrightarrow A_{9(RC)} = T_a$$

$$t = \infty \longrightarrow P_2 = \beta_f \cdot P_{REG(RC)}$$

Dessa forma, tem-se:

$$b_9 = 1$$

$$A_{9(RC)} = a_9 \cdot \beta_f \cdot P_{REG(RC)} + b_9 \cdot T_a \quad (2.84)$$

isolando a_9 , tem-se:

$$a_9 = \frac{A_{9(RC)} - T_a}{\beta_f \cdot P_{REG(RC)}} \quad (2.85)$$

Assim, obtêm-se A_6 :

$$A_9 = \left(\frac{A_{9(RC)} - T_a}{P_{REG(RC)}} \right) \cdot P_{REG(2)} + T_a \quad (2.86)$$

2.6.8 – Determinação do coeficiente $A_8 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Derivando (2.52) em $t = 0$, tem-se:

$$\frac{dT_f(0)}{dt} = A_7 \cdot s_7 + A_8 \cdot s_8 \quad (2.87)$$

Em $t=0$ tem-se:

$$\frac{dT_f(0)}{dt} = (X_{2(f)} - X_{3(f)} + X_{4(f)}) \cdot T_a \quad (2.88)$$

Considerando:

$$K_{6(f)} = (X_{2(f)} - X_{3(f)} + X_{4(f)}) \quad (2.89)$$

e igualando (2.87) e (2.88), tem-se:

$$K_{6(f)} = \frac{A_{7(RC)} \cdot s_7 + A_{8(RC)} \cdot s_8}{T_a} \quad (2.90)$$

Dessa forma, tem-se:

$$A_7 \cdot s_7 + A_8 \cdot s_8 = K_{6(f)} \cdot T_a \quad (2.91)$$

Em $t = 0$ para (2.52) e isolando A_7 :

$$A_7 = T_f(0) - A_9 - A_8 \quad (2.92)$$

Considerando $t = 0$, $T_f(0) = T_a$, $A_9 = f(\Delta P_{REG})$ e substituindo (2.92) em (2.91), tem-se:

$$A_8 = \frac{K_{6(f)} \cdot T_a + s_7(A_9 - T_a)}{(s_8 - s_7)} \quad (2.93)$$

2.6.9 – Determinação do coeficiente $A_7 = f(\Delta P_{REG})$ da equação da temperatura do ar no congelador em função da variação da potência elétrica de alimentação em regime permanente

Considerando $t=0$, $T_f(0) = T_a$, $A_8 = f(\Delta P_{REG})$, pode-se reescrever (2.92):

$$A_7 = T_a - A_9 - A_8 \quad (2.94)$$

CAPITULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA

3.1 – Introdução

Atualmente, os refrigeradores domésticos usam o conjunto motor-compressor hermeticamente fechados em um invólucro de aço. O rotor do motor é prensado no próprio eixo do compressor (virabrequim) e o estator é prensado no invólucro e fixado ao compressor através de parafusos. O conjunto motor-compressor hermético proporciona aos fabricantes menor custo de manutenção, menor nível de ruído em funcionamento e, para instalação, quase todo cuidado se resume na verificação se a tensão elétrica da tomada é da mesma grandeza da especificada na placa do motor [14].

Os motores utilizados em refrigeradores domésticos são de potência fracionária entre 1/9 HP a 1/3HP, monofásicos de dois ou quatro pólos, 110V/220V e 50/60Hz.

Os motores monofásicos são relativamente mais simples na forma construtiva, mas nem sempre são os mais simples de serem analisados. Devido a grande demanda, o mercado é competitivo e os projetistas usam as mais diversas formas para diminuir o custo de produção.

Uma das formas de se analisar o desempenho de um motor de indução em regime permanente é através de um circuito elétrico equivalente. Com o circuito elétrico equivalente, obtêm-se valores de grandezas características do motor, entre elas: correntes, conjugado desenvolvido, potência mecânica, rendimento, fator de potência e potência de perdas.

3.2 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico com capacitor de partida

Os motores de indução têm rotor em gaiola e um enrolamento monofásico distribuído no estator. Este motor tem a característica de não desenvolver nenhum conjugado de partida e, portanto, não consegue girar quando o enrolamento do estator é alimentado por uma fonte monofásica. Entretanto, se o rotor é colocado a girar ou tem sua partida realizada por meios auxiliares, ele permanece girando.

O método mais simples para proporcionar um conjugado de partida para um motor de indução monofásico é adicionar um enrolamento auxiliar ao estator, o qual tendo dois enrolamentos dispostos de forma conveniente, se comporta como um motor de indução bifásico, ou seja, com as correntes nos dois enrolamentos balanceadas e defasadas de 90° elétricos no tempo e, portanto, consegue desenvolver um conjugado de partida.

Na condição de funcionamento, um motor de indução monofásico pode desenvolver um conjugado somente com o enrolamento principal alimentado. Portanto, após a partida, a velocidade do motor aumenta, o enrolamento auxiliar poderá ser desconectado do circuito através de uma chave centrífuga instalada no circuito do enrolamento auxiliar.

Um alto conjugado de partida pode ser obtido conectando-se um capacitor em série com o enrolamento auxiliar, o qual permite aumentar o ângulo de fase das correntes dos enrolamentos principal e auxiliar.

Para análise do circuito equivalente do motor de indução monofásico utiliza-se a teoria do duplo campo girante. Neste modelo, a reatância de magnetização X_m é dividida entre as metades superior e inferior do circuito. A metade superior representa a componente de rotação direta do motor e a metade inferior representa a componente de rotação inversa do motor.

Freqüentemente, o modelo do motor é simplificado como mostrado na figura (4a), onde as impedâncias diretas e inversas do motor são definidas como $Z_f = R_f + j.X_f$ e $Z_b = R_b + j.X_b$, respectivamente.

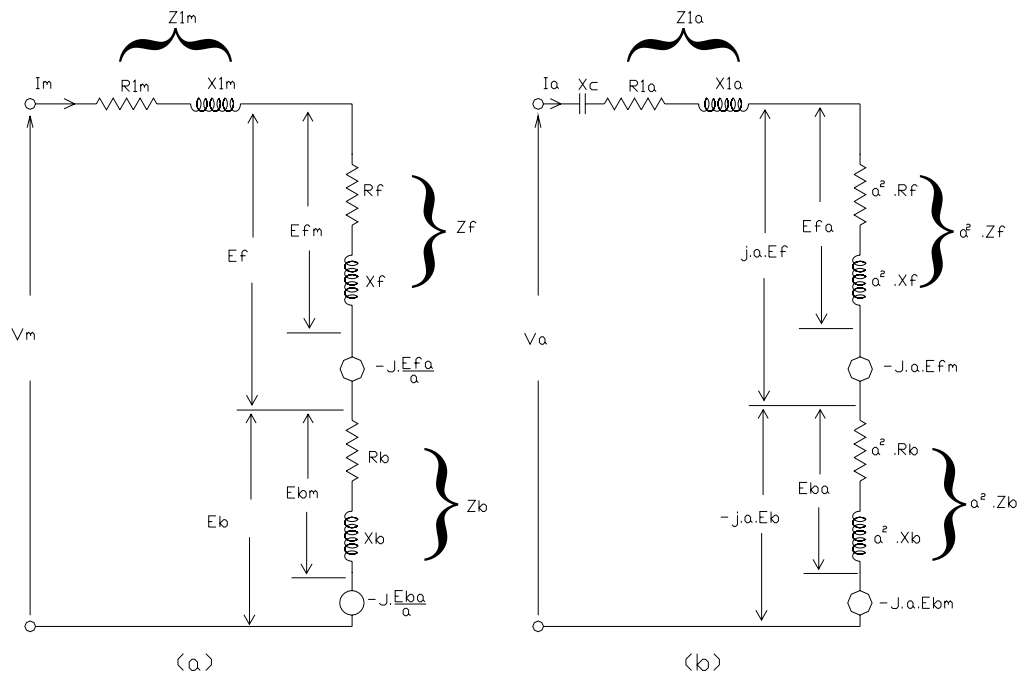


Figura 4 – Circuito equivalente do motor de indução monofásico: (a) em regime permanente; (b) com capacitor de partida.

A seguir, têm-se as equações das componentes das impedâncias direta e inversa.

$$R_f = \left(\frac{R_2 \cdot X_m^2}{2 \cdot s} \right) \cdot \frac{1}{(R_2 / s)^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (3.1)$$

$$R_b = \left(\frac{R_2 \cdot X_m^2}{2 \cdot (2 - s)} \right) \cdot \frac{1}{(R_2 / (2 - s))^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (3.2)$$

$$X_f = \left(\frac{X_m}{2} \right) \left[\frac{(R_2 \cdot s)^2 + X_2 \cdot (X_2 + X_m)}{(R_2 \cdot s)^2 + (X_2 + X_m)^2} \right] \quad (3.3)$$

$$X_b = \left(\frac{X_m}{2} \right) \left[\frac{[R_2 \cdot (2-s)]^2 + X_2 \cdot (X_2 + X_m)}{[R_2 \cdot (2-s)]^2 + (X_2 + X_m)^2} \right] \quad (3.4)$$

Para os parâmetros do motor de indução monofásico tem-se, R_{1m} e X_{1m} que são a resistência de enrolamento e reatância de dispersão do estator, R_2 e X_2 que são a resistência e a reatância de dispersão do rotor, e X_m que é a reatância de magnetização

De acordo com a Teoria do duplo campo girante, a potência eletromagnética média líquida de saída transferida pelo entreferro é igual a potência entregue à resistência direta R_f menos a potência entregue à resistência inversa R_b .

$$V_m = (Z_{1m} + Z_f + Z_b) \cdot I_m - j \cdot a \cdot (Z_f - Z_b) \cdot I_a \quad (3.5)$$

$$V_a = j \cdot a \cdot (Z_f - Z_b) \cdot I_m + (Z_c + Z_{1a} + a^2 \cdot Z_f + a^2 \cdot Z_b) \cdot I_a \quad (3.6)$$

As equações 3.5 e 3.6 são utilizadas para se calcular as correntes eficazes do enrolamento principal I_m e do enrolamento auxiliar I_a , pois as tensões do enrolamento principal V_m e do enrolamento auxiliar V_a são aplicadas pela mesma e única fonte de alimentação. Não se faz necessário utilizar-se de fontes que forneçam tensões defasadas entre si, como é o caso de aplicações de motores difásicos. Essa defasagem é promovida pela impedância do capacitor $Z_c = -j \cdot X_c$. A relação $a = N_a / N_m$ representa a proporcionalidade entre as espiras do enrolamento auxiliar e enrolamento principal do estator.

O conjugado desenvolvido pode ser calculado por:

$$T = \frac{2.a |I_a| \cdot |I_m| \cdot (R_f + R_b)}{\omega_s} \cdot \text{sen}(\theta_a - \theta_m) \quad (3.7)$$

onde:

θ_m - ângulo de fase da corrente do enrolamento principal

θ_a - ângulo de fase da corrente do enrolamento auxiliar

3.3 – Comportamento conjugado-escorregamento do motor de indução monofásico com variação de velocidade

Os conversores de frequência não têm sido amplamente usados com motores de indução monofásicos. Da mesma forma que para os conversores de motores de indução trifásicos, os conversores para os motores monofásicos não devem ser usados para operação em baixas velocidades.

A relação “Volts por Hertz” é usada para prover conjugado para uma determinada faixa de velocidade.

O motor de indução monofásico não se comporta igual ao motor trifásico na operação de variação de velocidade. O conjugado desenvolvido é obtido diminuindo substancialmente quando a frequência é reduzida. Além disso, a teoria do duplo campo girante requer que o conjugado médio deve ser zero na velocidade zero, indiferentemente da frequência da fonte.

O motor de indução monofásico pode ser usado com sucesso com fonte de potência com frequência variável. A velocidade do motor pode ser facilmente ajustada.

3.4 – Variação de velocidade através do controle da tensão e da frequência do motor monofásico

Mantendo-se constante a relação tensão frequência, o fluxo no entreferro permanece constante. Entretanto em baixas frequências, o fluxo de entreferro é reduzido, devido à queda de tensão na impedância do estator e a tensão de alimentação tem que ser aumentada para manter o nível do conjugado. Este tipo de controle é usualmente conhecido como controle Volts por Hertz.

O valor de d é determinado a partir da tensão nominal U_n e da frequência angular nominal ω_n , é dada por:

$$d = \frac{U_n}{\omega_n} \quad (3.9)$$

A relação da tensão de alimentação U_1 e da frequência angular ω_e , mantida constante no controle Volts por Hertz, é dada por:

$$d = \frac{U_1}{\omega_e} \quad (3.8)$$

CAPITULO 4

APLICATIVOS COMPUTACIONAIS

4.1 – Introdução

A solução das equações do modelo matemático é obtida através de um aplicativo computacional, utilizando-se a linguagem MATLAB™.

O aplicativo divide-se em sete blocos, sendo um principal e seis para cálculos e geração de gráficos.

A interface gerada pelo aplicativo principal permite ao usuário calcular os parâmetros e coeficientes de cada sub-rotina e ilustrar graficamente os resultados.

As sub-rotinas SUBROTINA_MTR_1F e SUBROTINA_MTR_1F_RUN são estruturadas em arquivos separados, mas dependentes entre si para o cálculo dos parâmetros do motor e a cada passo de execução durante a partida e em regime permanente.

Os aplicativos para calcular e comparar resultados das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador, do ar no gabinete de refrigeração e da potência elétrica de entrada do motor de indução monofásico utiliza-se dos dados obtidos nos ensaios, arquivados em planilhas do Microsoft Excel™.

O diagrama de blocos simplificado da rotina principal e do comportamento térmico, e as sub-rotinas são apresentados nos itens 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

4.2 – Diagrama de blocos simplificado do aplicativo computacional para simulação do comportamento térmico

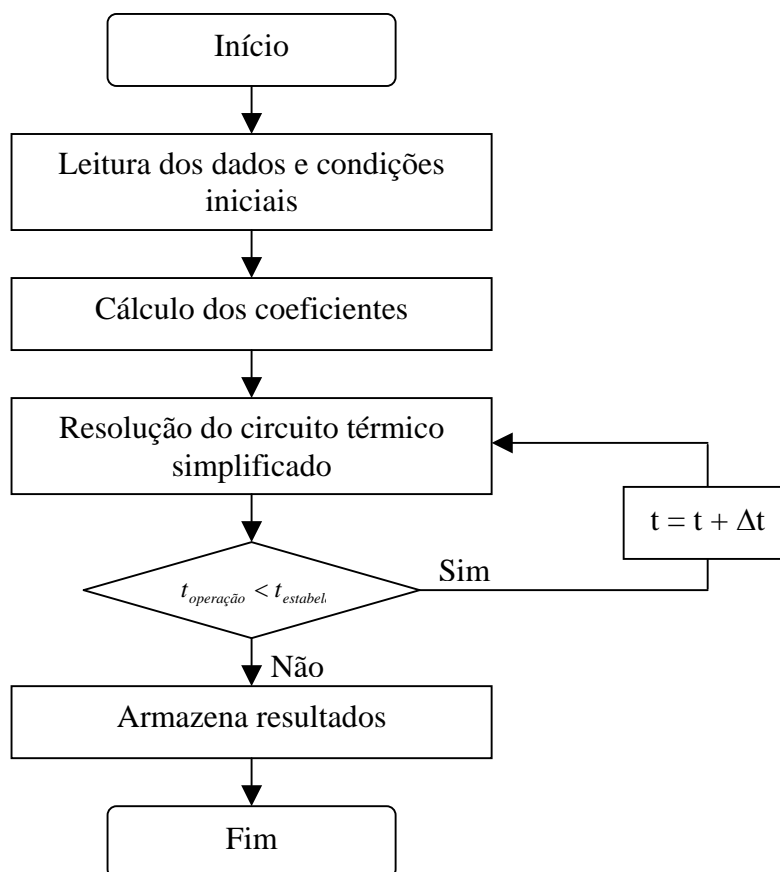


Figura 5 – Diagrama de blocos do aplicativo para simulação do comportamento térmico

4.3 – Diagrama de blocos simplificado do aplicativo computacional para simulação do desempenho do motor de indução

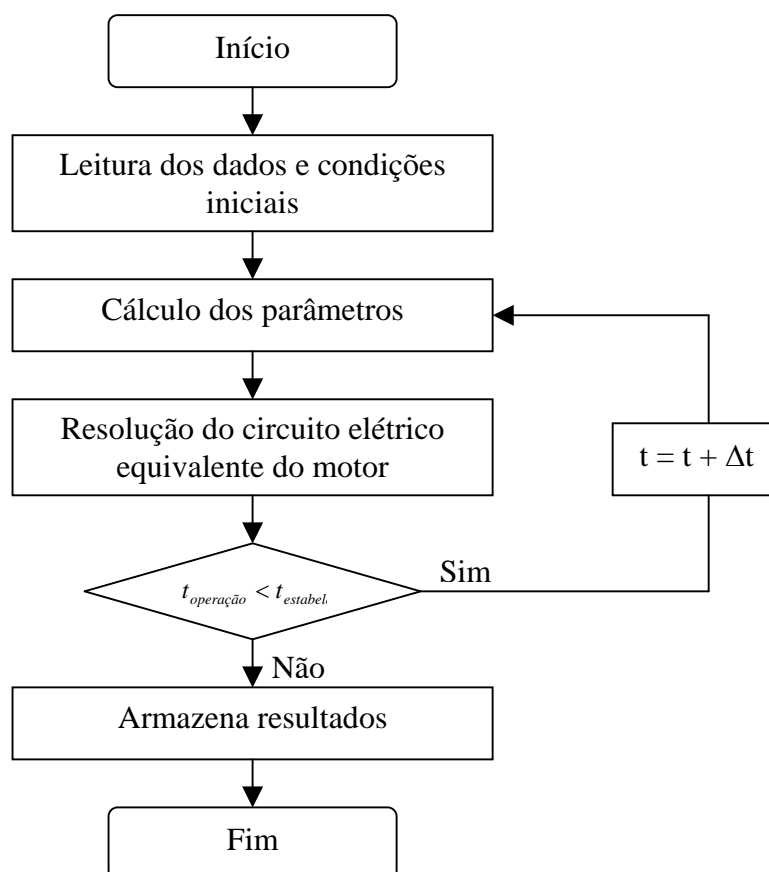


Figura 6 – Diagrama de blocos do aplicativo para simulação do desempenho do motor de indução

4.4 – Apresentação das rotinas e sub-rotinas utilizadas

4.4.1 – Rotina PRINCIPAL

Ao acessar o ambiente do MATLAB™, a tela de interface com o usuário executam as respectivas sub-rotinas de simulação.

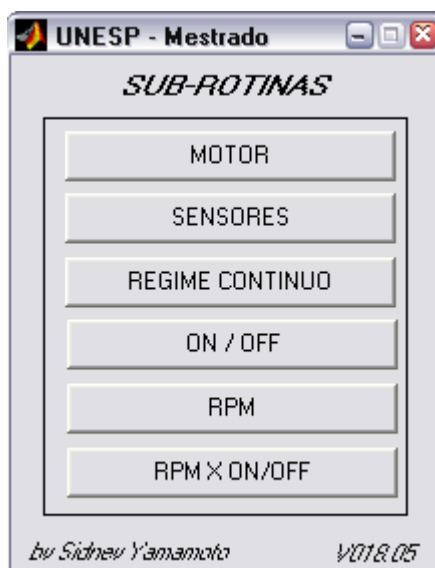


Figura 7 – Tela do Programa Principal

4.4.2 – Sub-rotina SUBROTINA_MTR_1F

Resolução do sistema de equações que representa o motor monofásico, durante o processo de partida e em regime permanente, onde solicita a execução da sub-rotina SUBROTINA_MTR_1F_RUN alterando as condições impostas pelas variáveis para desacoplamento do circuito auxiliar com capacitor de partida e colocando o sistema em regime permanente.

4.4.3 – Sub-rotina SUBROTINA_MTR_1F_RUN

Determina as grandezas elétricas e mecânicas do motor através da resolução do circuito elétrico equivalente, utilizando-se das equações da teoria do duplo campo girante, durante o processo de partida e regime permanente.

4.4.4 – Sub-rotina SUBROTINA_REG_CONT

Para a determinação dos coeficientes das equações do circuito térmico simplificado utiliza-se o método dos mínimos quadrados, através da *função nlinfit* do MATLAB™. Com os coeficientes definidos, simulam-se as curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador, do ar no gabinete de refrigeração e potência elétrica ativa de entrada nas condições reais de funcionamento, obtidas nos ensaios.

4.4.5 – Sub-rotina SUBROTINA_RPM

Apresenta os resultados das equações do circuito térmico simplificado, determinado no capítulo 2, simulando as curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, nas condições estimadas de funcionamento para cada ponto de frequência imposto para modulação de velocidade.

4.4.6 – Sub-rotina SUBROTINA_ONOFF

O comportamento ON-OFF das curvas das temperaturas obtidas no ensaio, são tratadas de forma distintas, sendo uma com constante de tempo positiva e a outra negativa, determinadas pelo o método dos mínimos quadrados

pela *função nlinfit* do MATLAB™. Com os coeficientes definidos, simulam-se as curvas da temperatura na parede do evaporador, do ar no congelador, do ar no gabinete de refrigeração e potência elétrica ativa de entrada nas condições reais de funcionamento.

4.4.7 – Sub-rotina SUBROTINA_RPM_X_ONOFF

Simula as curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador, do ar no gabinete de refrigeração e potência elétrica ativa de entrada nas condições de funcionamento em regime ON-OFF e com variação de velocidade para comparar as potências elétricas consumidas nos dois casos.

4.4.8 – Sub-rotina SUBROTINA_SENSORES

Apresenta os resultados das equações das curvas dos sensores de temperatura, obtidas através de ensaios.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS E RESULTADOS

5.1 – Introdução

Neste capítulo apresentam-se resultados obtidos experimentalmente sobre o comportamento térmico de um refrigerador doméstico. Estes dados foram obtidos, submetendo um refrigerador doméstico às condições de funcionamento pleno, à máxima capacidade de refrigeração.

5.2 – Sistema experimental

Inicialmente, foram realizados ensaios com o termômetro Penta Five Sensors para determinação das curvas reais dos sensores e realizar as correções dos desvios por equacionamento individual.

Com o termômetro digital Penta Five Sensors com as seguintes características técnicas:

- 5 canais de entrada com sensores de temperatura termopar tipo K,
- faixa de medição de -50C à 150C,
- resolução 0,1°C,
- precisão de +/-0,3% f.e.,
- cabo dos sensores tipo Coaxial 1X24 AWG (1,5metro).

Para a medição nas junções dos termopares foram utilizados os sensores referentes aos canais dois ao cinco.

Os sensores utilizados apresentam curvas características lineares, no entanto com pequenas variações de referência. Para a minimização do

efeito de off-set, foi medida a tensão gerada por cada termopar, variando-se a temperatura nas junções do termopar e calculando sua curva real.

São apresentados nos gráficos 8 e 9 as curvas obtidas no ensaio dos termopares e as curvas das equações que descrevem o comportamento destes sensores dos canais 2 e 3, respectivamente.

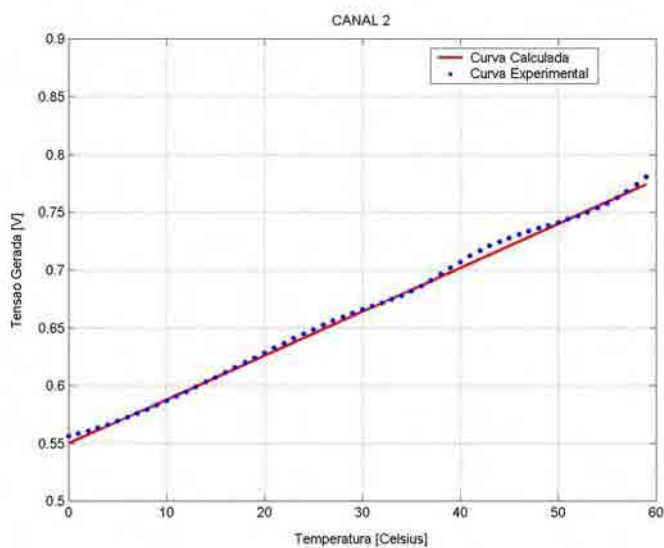


Figura 8 – Curvas obtidas do ensaio do termopar do CH2 e do equacionamento teórico

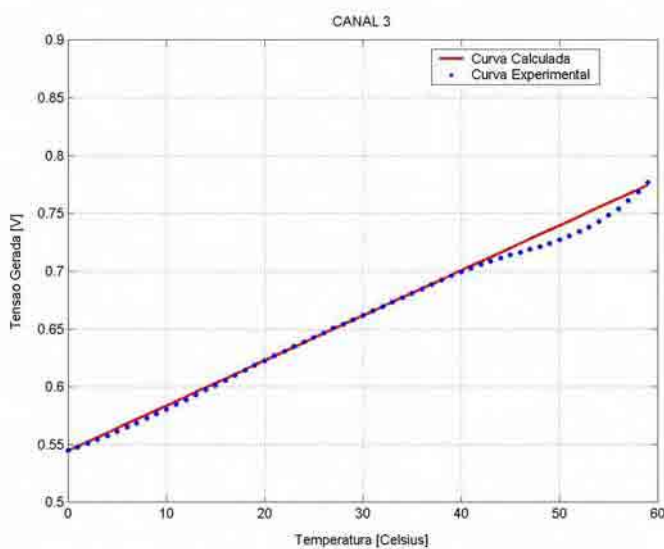


Figura 9 – Curvas obtidas do ensaio do termopar do CH3 e do equacionamento teórico

São apresentados nos gráficos 10 e 11 as curvas obtidas nos ensaios dos termopares e as curvas das equações que descrevem o comportamento destes sensores dos canais 4 e 5, respectivamente.

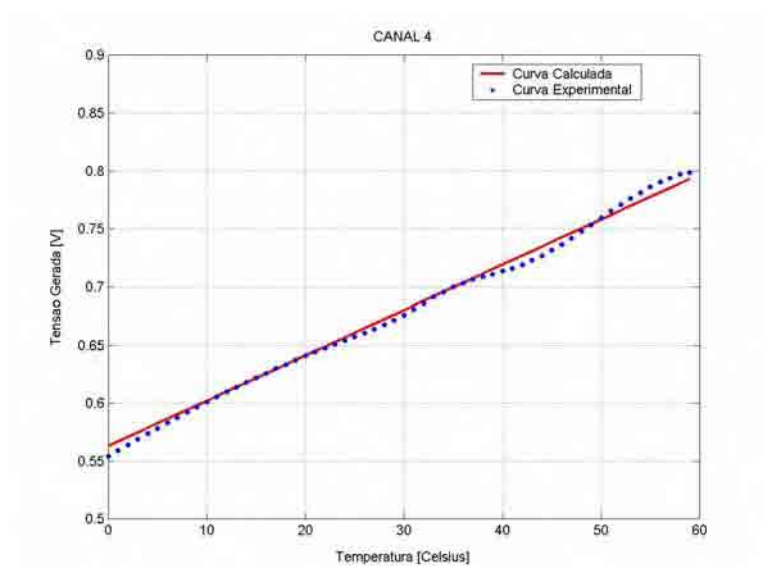


Figura 10 – Curvas obtidas do ensaio do termopar do CH4 e do equacionamento teórico

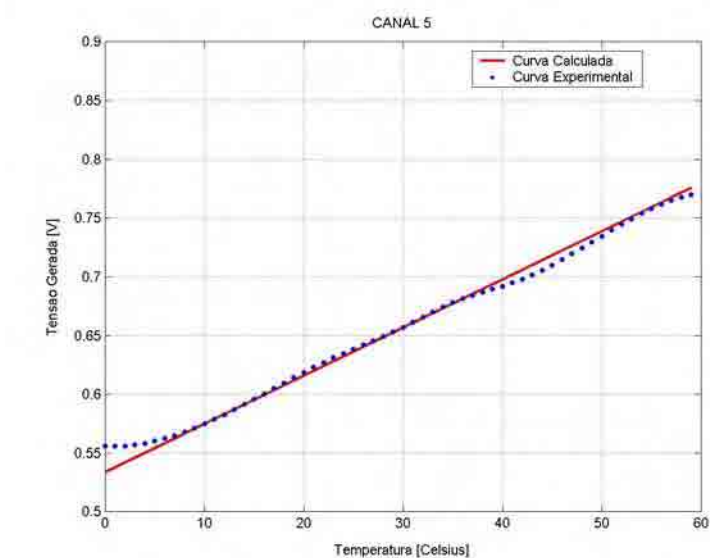


Figura 11 – Curvas obtidas do ensaio do termopar do CH5 e do equacionamento teórico

Baseados nas curvas obtidas foram calculados os coeficientes da equação de reta para cada sensor de temperatura, onde U_CH representa a tensão gerada para cada sensor e TCH é o respectivo valor da temperatura.

$$U_CH2=0.0038*TCH2+0.55$$

$$U_CH3=0.0039*TCH3+0.5446$$

$$U_CH4=0.0039*TCH4+0.5632$$

$$U_CH5=0.0041*TCH5+0.5337$$

Com as curvas dos sensores calibradas, iniciam-se os ensaios com o refrigerador.

O sistema é composto pelo refrigerador doméstico:

-marca: Consul

-modelo CRA30BBANA

-volume total nominal: 293 litros

-compressor hermético, modelo EM30HNR, protegido termicamente, com motor monofásico de 86 W / 115Vac / 60Hz, com capacitor de partida, utilizando R134a como gás refrigerante.

Na figura 12, apresenta-se um diagrama esquemático do sistema experimental utilizado para obter os dados necessários para análise do comportamento térmico do refrigerador doméstico.

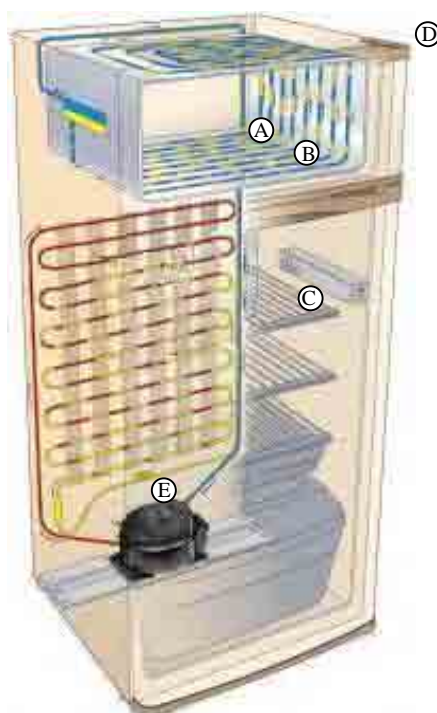


Figura 12 – Refrigerador Doméstico

Os sensores utilizados para a medição das temperaturas internas foram instalados nos locais indicados na figura 12:

A - Medição da temperatura do ar no congelador: Instalado sensor do CH2

B - Medição da temperatura na parede do evaporador: Instalado sensor do CH3

C - Medição da temperatura do ar no gabinete de refrigeração:
Instalado sensor do CH4

D - Medição da temperatura ambiente: Instalado sensor do CH5

E - Medição da potência elétrica ativa de entrada

Os ensaios foram divididos em duas partes:

- ensaio em regime contínuo onde foi desligado o termostato do refrigerador, desativando o controle ON-OFF convencional e,
- ensaio com o controle ON-OFF ativado.

Para ambos os ensaios, consideram-se os mesmos procedimentos e posição dos sensores para obtenção dos dados.

Para condição inicial dos ensaios, desligou-se o refrigerador para permitir o degelo total e equalização das temperaturas internas com a do ambiente. Dessa forma as temperaturas nos pontos A, B e C são iguais à temperatura ambiente na condição inicial.

A medição de temperatura nos pontos A, B e C foi realizada fixando os termopares na parede do evaporador, no ar do congelador e no ar do gabinete de refrigeração, respectivamente, em intervalos de 1 minuto, finalizando no tempo total de 246 minutos.

Para medição da temperatura ambiente no ponto D, e das tensões geradas pelos termopares, foi utilizado o multímetro digital Minipa ET-2042:

-para medição de temperatura

-faixa de trabalho de -40°C à 1000°C

-resolução: 1°C

-precisão $< 400^{\circ}\text{C}$ $\pm (0,75\% + 3\text{D})$

-tipo de sensor: termopar tipo K.

-para medição de tensão:

-faixa / precisão / resolução: $200\text{mV} / \pm (0,5\% + 3\text{D}) / 100\mu\text{V}$,
 $2\text{V} / \pm (0,5\% + 3\text{D}) / 1\text{mV}$.

-impedância de Entrada: 10Mohm

Além das medições de temperatura, foi-se medido a potência elétrica ativa de entrada, através de um wattímetro, 0-150W, precisão 0.5%, instalado no ponto E.

As curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador, resultantes dos dados coletados, são mostradas nas figuras 13 e 14, respectivamente, para o sistema em regime contínuo (RC).

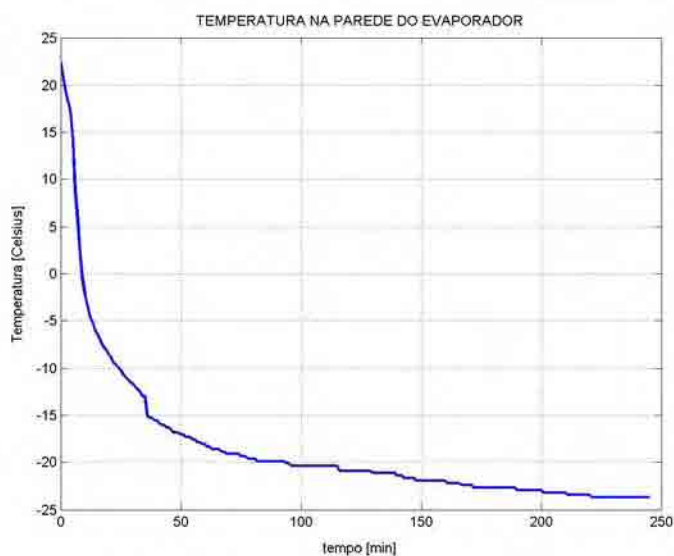


Figura 13 – Curva da temperatura na parede do evaporador obtida no ensaio

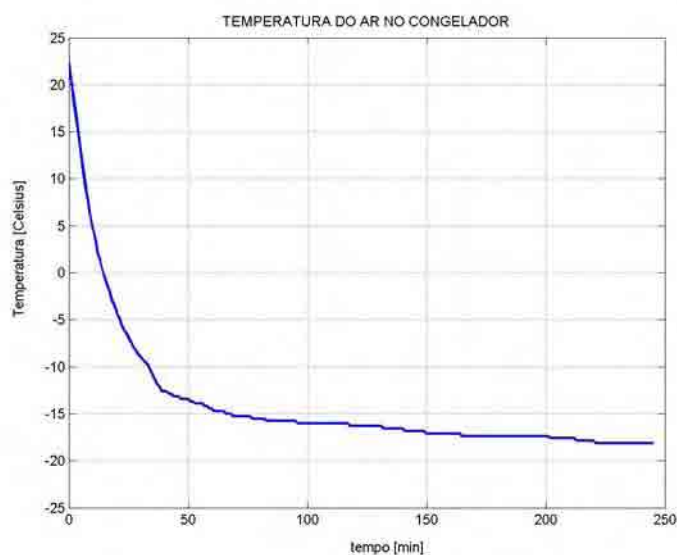


Figura 14 – Curva da temperatura do ar no congelador obtida no ensaio

As curvas das temperaturas do ar no gabinete de refrigeração e da potência elétrica ativa de entrada medidas, resultantes dos dados coletados, são

mostradas nas figuras 15 e 16, respectivamente, para o sistema em regime contínuo (RC).

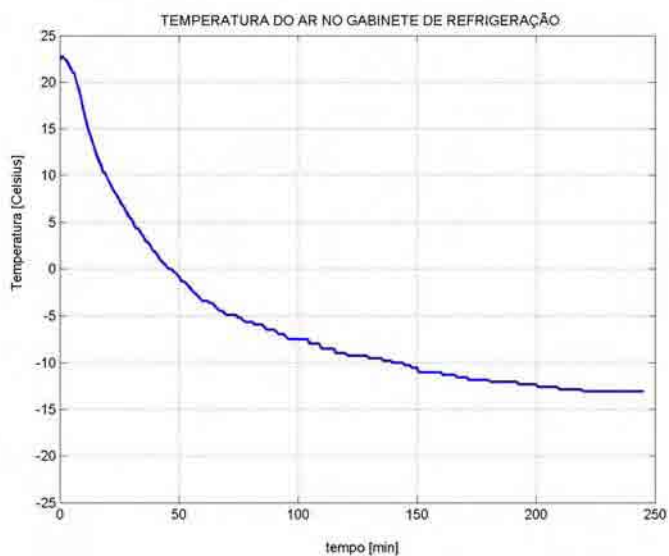


Figura 15 – Curva da temperatura do ar no gabinete de refrigeração obtida no ensaio

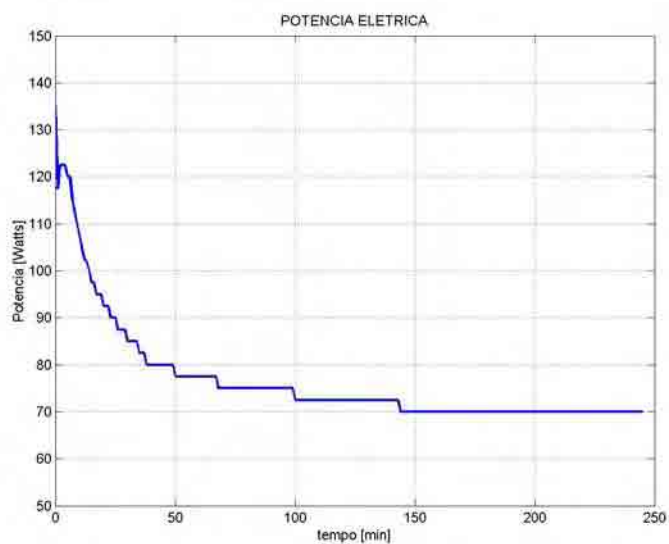


Figura 16 – Curva da potência elétrica ativa de entrada do motor de indução obtida no ensaio

As curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador, resultantes dos dados coletados, são mostradas nas figuras 17 e 18, respectivamente, para o sistema ON-OFF.

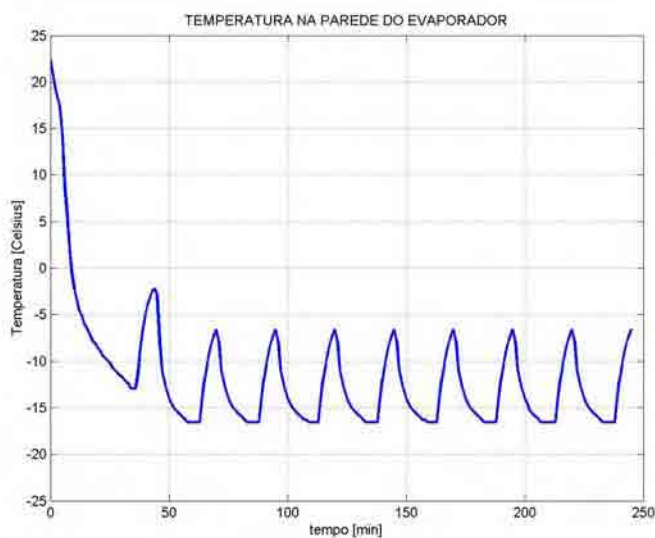


Figura 17 – Curva da temperatura na parede do evaporador obtida no ensaio do sistema ON-OFF

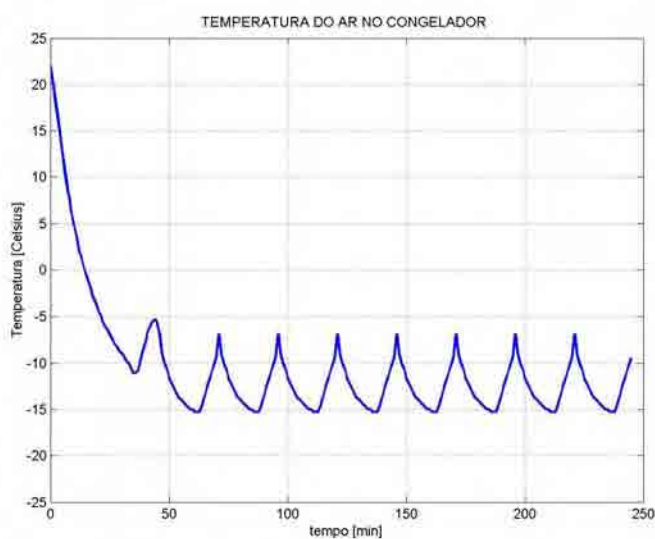


Figura 18 – Curva da temperatura do ar no congelador obtida no ensaio do sistema ON-OFF

As curvas das temperaturas do ar no gabinete de refrigeração e da potência elétrica ativa de entrada medidas, resultantes dos dados coletados, são mostradas nas figuras 19 e 20, respectivamente, para o sistema ON-OFF.

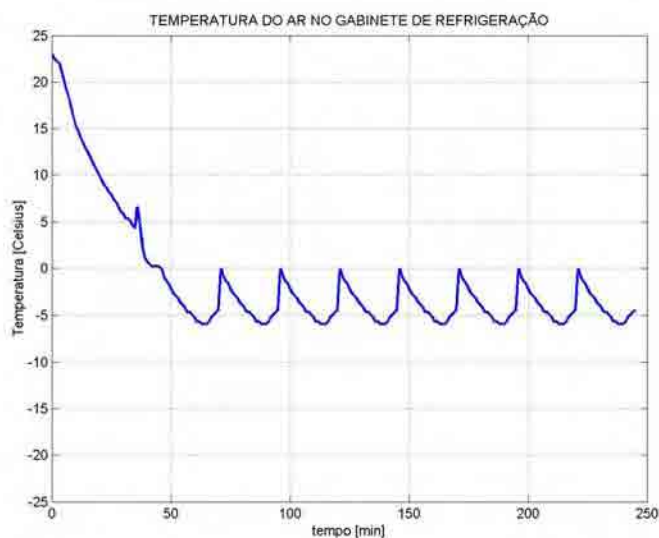


Figura 19 – Curva da temperatura do ar no gabinete de refrigeração obtida no ensaio do sistema ON-OFF

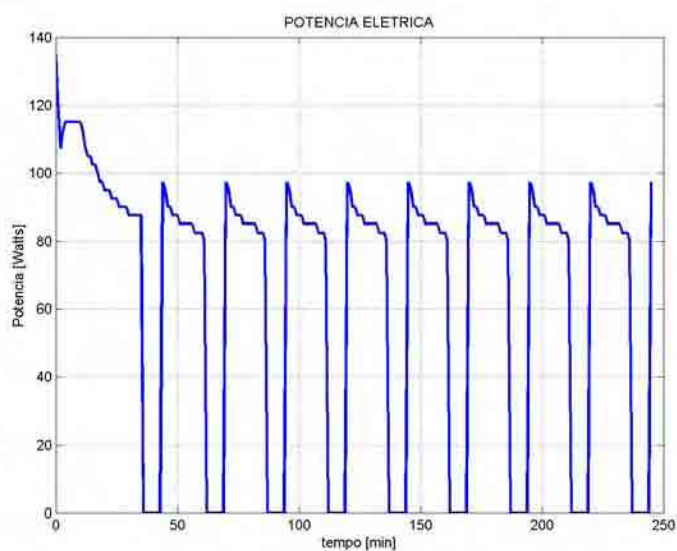


Figura 20 – Curva da potência elétrica ativa de entrada obtida no ensaio do sistema ON-OFF

CAPÍTULO 6

VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

6.1 – Introdução

Para que se possa verificar a validade do modelo matemático proposto, foram realizadas simulações, impondo-se as mesmas condições de funcionamento, quanto aos regimes e condições de carga. Os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios, para cada um dos regimes de funcionamento foram colocados em gráficos para que fossem feitas as devidas comparações.

Os resultados apresentados são os de variação da temperatura no interior do refrigerador doméstico e potência elétrica ativa de entrada, medidas pelos sensores de temperatura colocados nos pontos A, B, C e D, e wattímetro no ponto E, da figura 12.

6.2 – Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do sistema térmico em regime contínuo

As temperaturas finais obtidas no ensaio e simulação, e os desvios padrão entre as curvas obtidas nos ensaios são mostrados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Temperaturas finais de ensaio e simulação

Local	Temperatura final (°C)		Diferença
	Ensaio	Simulação	
Parede do evaporador	-23,7436	-21,8994	0,7451
Ar no Congelador	-18,1579	-16,9918	1,1661
Ar no Gabinete de refrigeração	-13,1282	-12,3831	1,8442

Tabela 2 – Desvio padrão entre as curvas de temperatura

Local	Desvio Padrão (%)
Parede do evaporador	1,6354
Ar no Congelador	0,6998
Ar no Gabinete de refrigeração	0,7219

Para as temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, o desvio padrão representa distorções médias positiva ou negativas de 0,3883°C, 0,1271°C e 0,0948°C, respectivamente.

Na figura 21 é apresentado o comportamento das três curvas de temperatura na parede do evaporador, no ar do congelador e no ar do gabinete de refrigeração, obtidas no ensaio. Na figura 22, compara-se a curva obtida no ensaio de regime contínuo e a curva calculada através da equação simplificada para a temperatura na parede do evaporador.

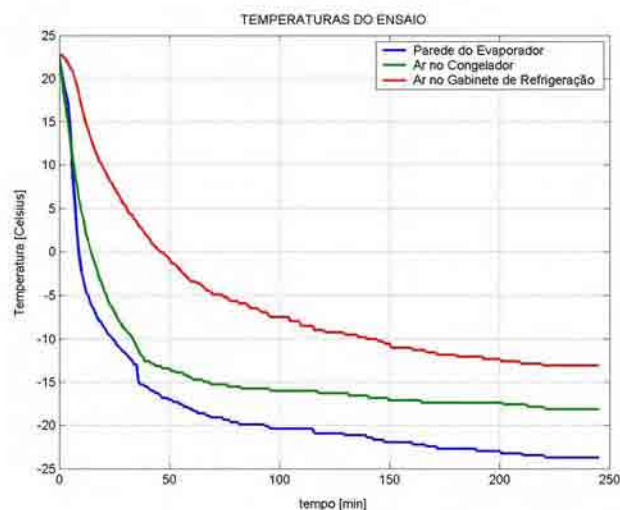
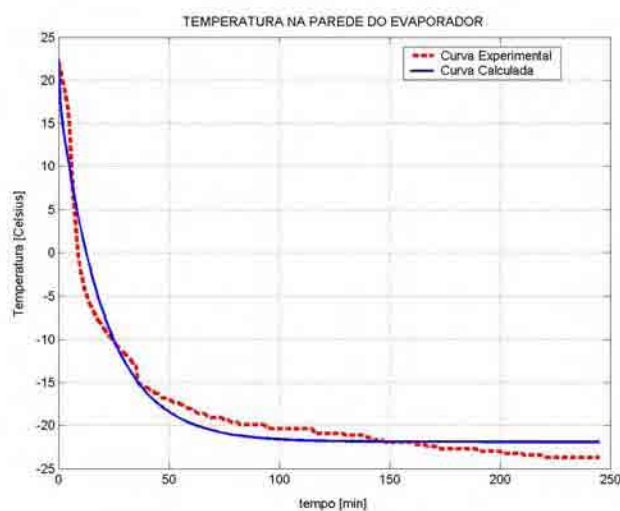
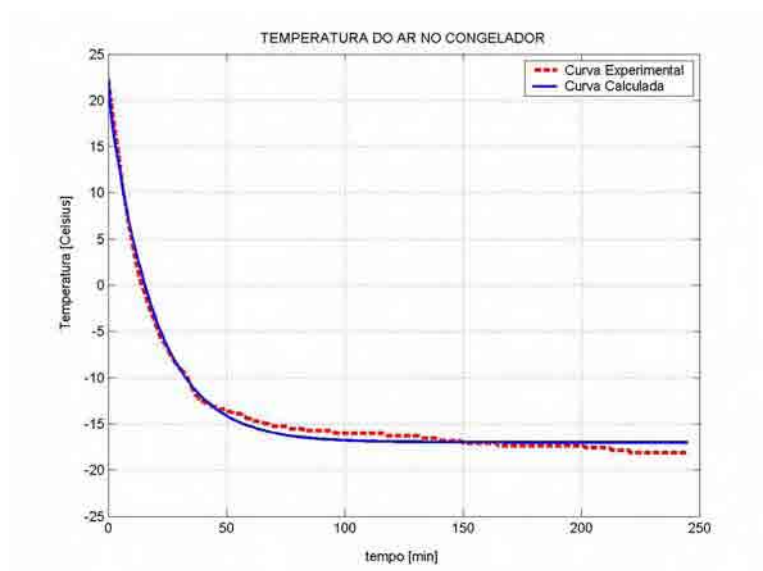


Figura 21 – Curvas das temperaturas de ensaio na parede do evaporado, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração obtidas através dos ensaios RC

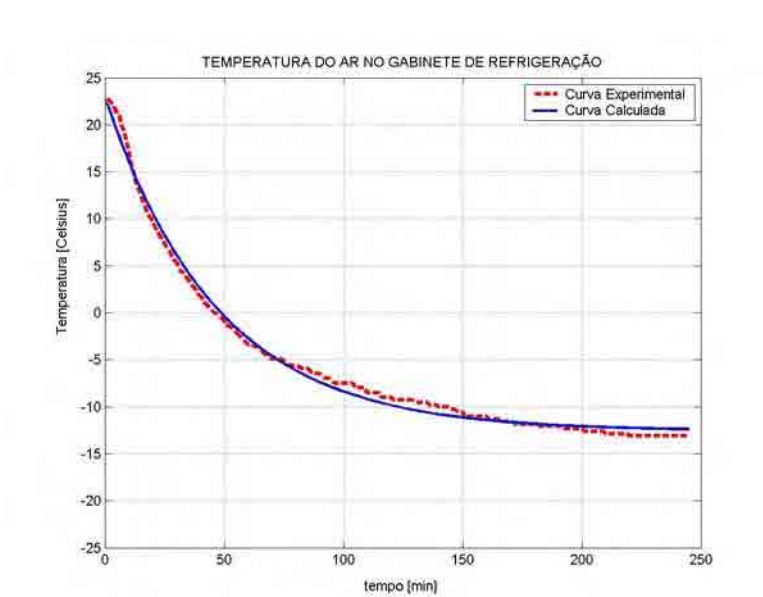


Figuras 22 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada do modelo matemático na parede do evaporador

Nas figuras 23 e 24, comparam-se as curvas obtidas nos ensaios de regime contínuo e a curva calculada através da equação simplificada para as temperaturas do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, respectivamente.

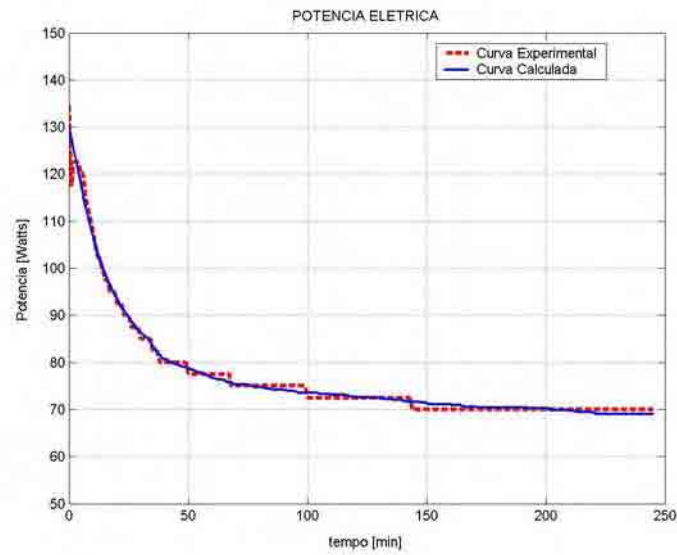


Figuras 23 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada do ar no congelador



Figuras 24 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada do ar no gabinete de refrigeração

Na figura 25, compara-se a curva obtida no ensaio de regime contínuo e a curva calculada através da equação simplificada para potência elétrica ativa de entrada.



Figuras 25 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada da potência Elétrica Ativa de Entrada

6.3 – Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do sistema térmico em regime ON-OFF

As Temperaturas de ON e OFF, os desvios padrão e os consumos diários são mostrados nas tabelas 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3 – Temperaturas de ON do refrigerador do ensaio e simulação

Local	Temperatura ON (°C)		Diferença
	Ensaio	Simulação	
Parede do evaporador	-6,5640	-6,2907	0,2733
Ar no Congelador	-6,8421	-6,6298	0,2123
Ar no Gabinete de refrigeração	-0,0513	-0,0515	0,0002

Tabela 4 – Temperaturas de OFF do refrigerador do ensaio e simulação

Local	Temperatura OFF (°C)		Diferença
	Ensaio	Simulação	
Parede do evaporador	-16,5641	-16,5942	0,0301
Ar no Congelador	-15,2632	-15,2921	0,0289
Ar no Gabinete de refrigeração	-5,9487	-6,0025	0,0538

Tabela 5 – Desvio padrão entre as curvas de temperatura ON / OFF

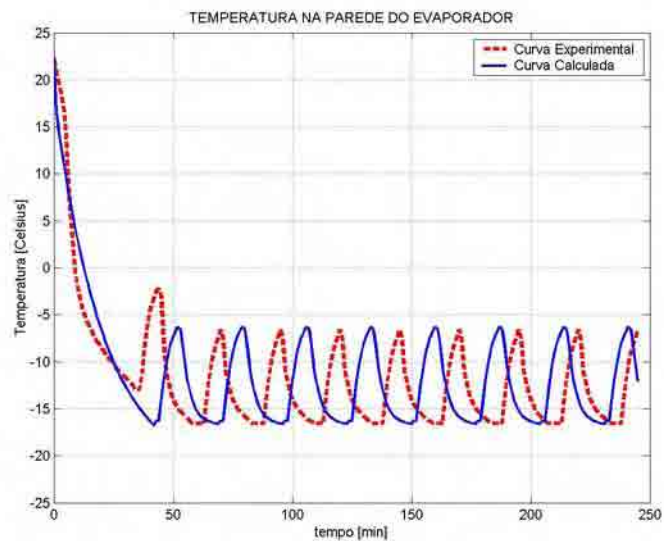
Local	Desvio Padrão (%)
Parede do evaporador	5,8762
Ar no Congelador	3,9319
Ar no Gabinete de refrigeração	2,6794

Para as temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, o desvio padrão representa distorções médias positiva ou negativas de 0,4155·C, 0,3311°C e 0,1580°C, respectivamente.

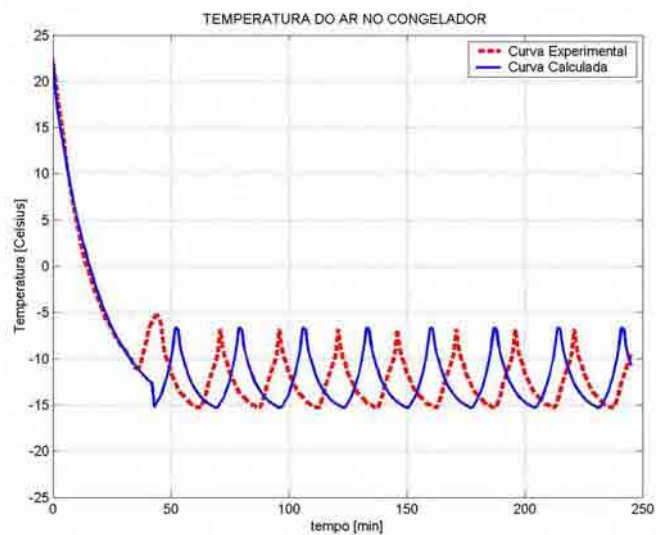
Tabela 6 – Consumo diário obtido das curvas de ensaio e simulação para sistema convencional ON - OFF

Consumo Diário (Kwh/24h)		Diferença
Ensaio	Simulação	
14,8310	13,4890	1,342

Nas figuras 26 e 27, comparam-se as curvas obtidas nos ensaios de regime ON-OFF e a curva calculada através da equação simplificada para as temperaturas na parede do evaporador e do ar no congelador, respectivamente.

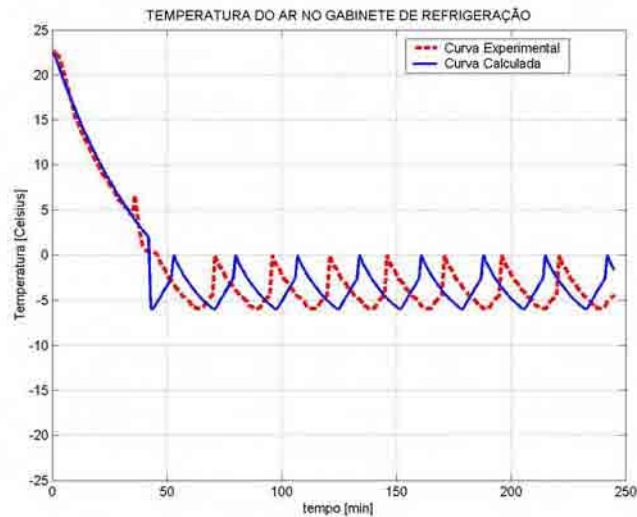


Figuras 26 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada na parede do evaporador no sistema ON - OFF

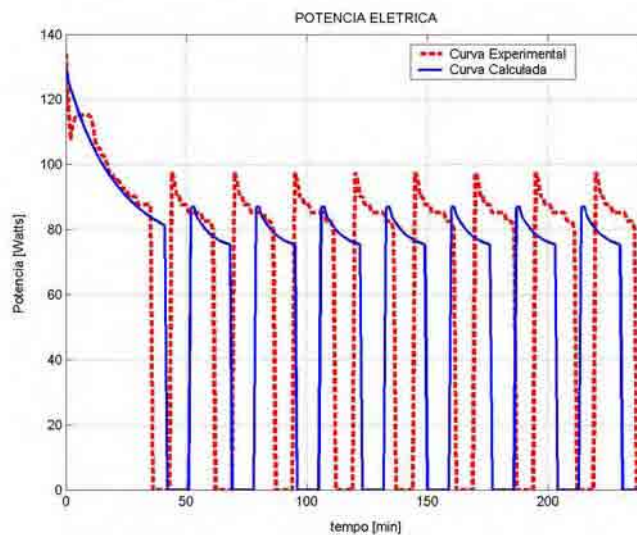


Figuras 27 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada do ar no congelador no sistema ON - OFF

Nas figuras 28 e 29, comparam-se as curvas obtidas nos ensaios de regime ON-OFF e a curva calculada através da equação simplificada para a temperatura do ar no gabinete de refrigeração e potência elétrica ativa de entrada, respectivamente.

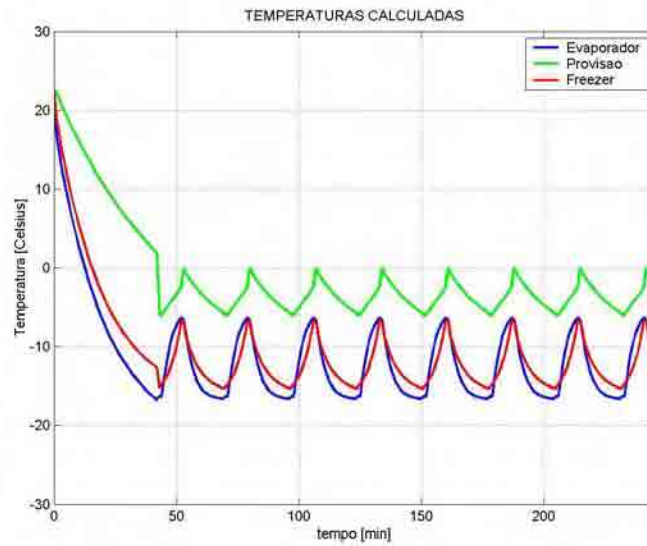


Figuras 28 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada do ar no gabinete de refrigeração no sistema ON-OFF



Figuras 29 – Curvas das temperaturas de ensaio e calculada da potência elétrica ativa de entrada no sistema ON-OFF

Na figura 30, têm-se as curvas calculadas através das equações simplificadas para as temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração do regime ON-OFF.



Figuras 30 – Curvas das temperaturas de ensaio na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração no sistema ON-OFF

6.4 - Comentários

Na figura 21, têm-se as curvas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, obtidas nos ensaios do refrigerador em regime contínuo. Pelo desvio padrão, pode-se dizer que há pouca distorção entre a curva real (ensaio) e a representada pela equação simplificada.

Na figura 25, têm-se as curvas de potência elétrica ativa de entrada obtida no ensaio e a gerada pela equação simplificada, conforme [17], utilizando as temperaturas teóricas e os coeficientes calculados pelo método dos mínimos quadrados, baseados na curva experimental. Observa-se no gráfico da potência elétrica de ensaio um transitório da curva, e em seguida um novo pico. Isto ocorre no momento da partida do motor de indução onde a corrente é elevada para gerar conjugado suficiente para iniciar o movimento do rotor e reduz conforme o mesmo se movimenta, estabilizando com velocidade nominal e conjugado constante. Como o tempo de partida do motor é menor que o tempo para atingir equilíbrio no fluxo do fluido refrigerante no sistema térmico, ocorre o segundo pico de corrente para atender a demanda de potência solicitada pelo compressor.

Nas figuras 26, 27 e 28, comparam-se as curvas em regime ON-OFF do refrigerador. Pela figura 28, nota-se os momentos de ON e OFF do motor que ocorrem nos momentos de aumento e diminuição das temperaturas na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração. Observa-se que nas curvas obtidas pelo ensaio tem-se, no primeiro ciclo ON-OFF, a atuação antecipada do termostato, iniciando o desligamento do compressor antes do valor de referência e a partir do segundo ciclo, o sistema se estabiliza. Como são consideradas condições ideais para obtenção do equacionamento matemático, tem-se, neste primeiro ciclo, uma queda brusca no primeiro ponto de desligamento do compressor.

Na figura 30, apresenta as três curvas de temperaturas calculadas, permitindo observar-se que existe a simultaneidade nos tempos de ON e OFF.

Como no sistema proposto são desprezadas inúmeras variáveis de campo para simplificar o equacionamento, nota uma defasagem entre as curvas teóricas e experimentais, onde se tem a diferença de consumo entre as curvas de ensaio e simulação em 1,342 Kwh/24h, representando uma distorção de 9,0486%.

CAPÍTULO 7

UTILIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO PARA ANALISAR O COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO OPERANDO COM VELOCIDADE VARIÁVEL

7.1 – Resultados obtidos nas simulações do sistema elétrico análogo ao sistema térmico para variação de velocidade (RPM)

Com a modulação de velocidade variando a cada 5 HZ, até 40Hz, tem-se as temperaturas finais na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, conforme se pode observar na tabela 7.

Tabela 7 – Temperaturas finais em (°C) em função da variação de velocidade

Local	Frequência (Hz)				
	60	55	50	45	40
Parede do evaporador (°C)	-20,69	-18,38	-16,38	-14,43	-12,82
Ar no Congelador (°C)	-15,92	-13,97	-12,08	-10,35	-8,05
Ar no Gabinete de Refrigeração (°C)	-11,43	-9,72	-8,05	-6,52	-5,25

Os dados da tabela 7 são mostrados na figura 31, onde apresenta um comportamento proporcional e linear com a variação de velocidade do motor de indução. Na figura 32 são apresentadas as curvas da temperatura na parede do evaporador para variação da frequência de alimentação, de 40Hz à 60Hz, aplicada ao motor.

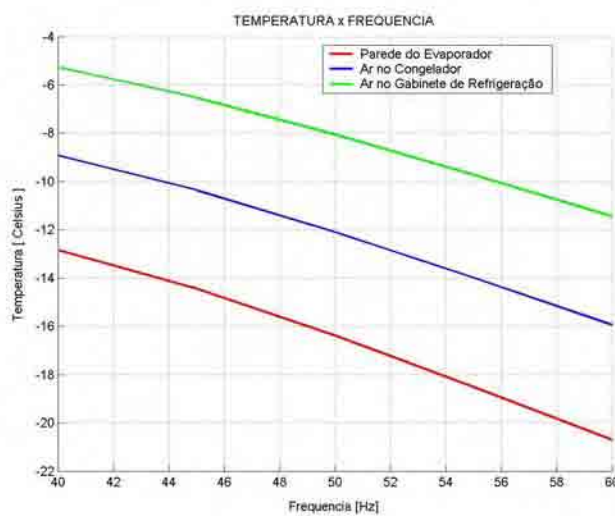
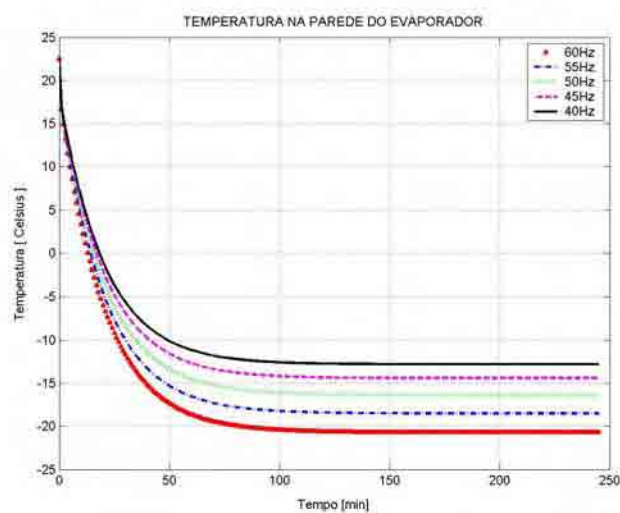
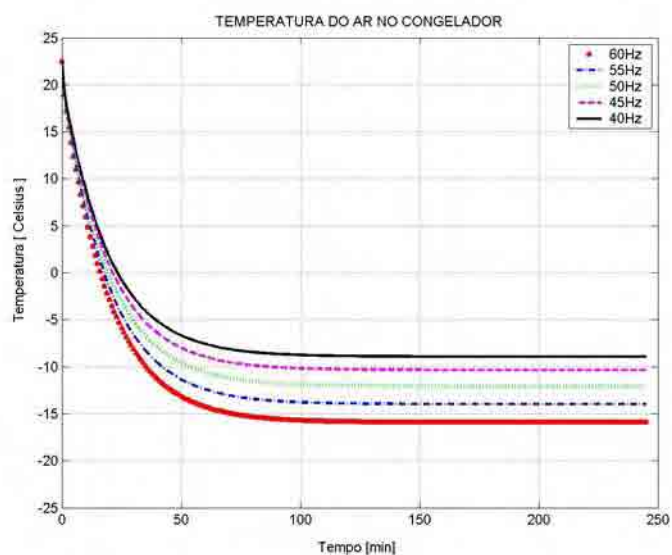


Figura 31 – Comportamento das temperaturas conforme variação de velocidade do motor

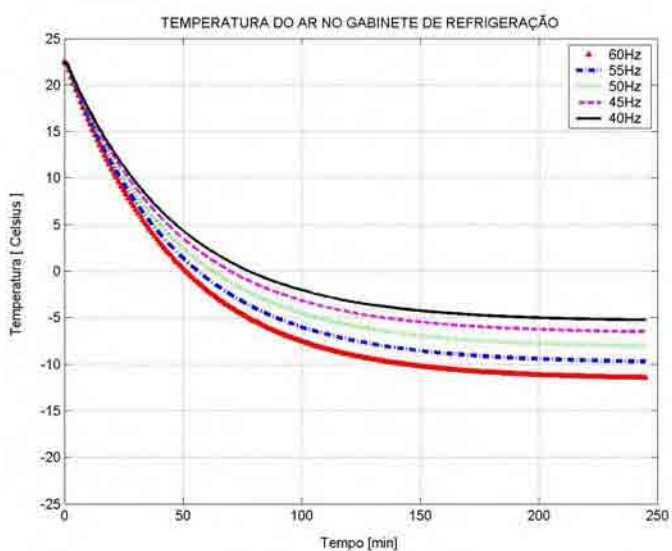


Figuras 32 – Curvas das temperaturas na parede do evaporador com variação de velocidade do motor

Nas figuras 33 e 34 são apresentadas as curvas das temperaturas do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração para cada frequência aplicada ao motor, respectivamente.

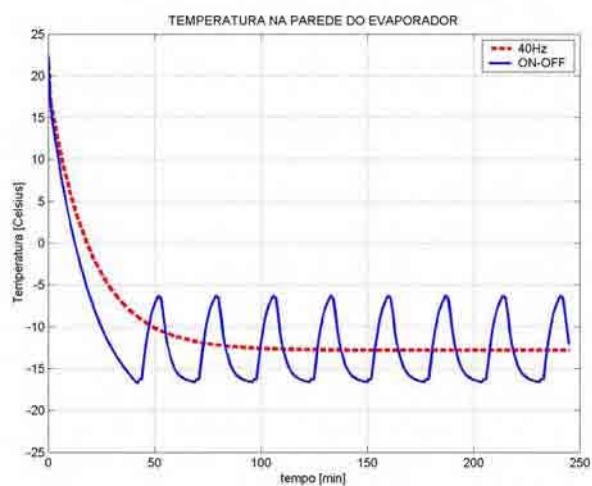


Figuras 33 – Curvas das temperaturas do ar no congelador com variação de velocidade do motor

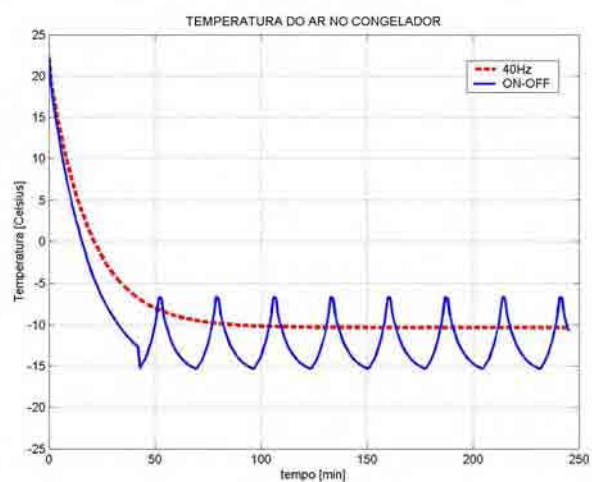


Figuras 34 – Curvas das temperaturas do ar no gabinete de refrigeração com variação de velocidade do motor

Nas figuras 35 e 36 são apresentados os comparativos entre as curvas das temperaturas calculadas pelas equações simplificadas do sistema ON-OFF e com frequência de alimentação do motor para 40Hz em regime contínuo, na parede do evaporador e do ar no congelador, respectivamente.

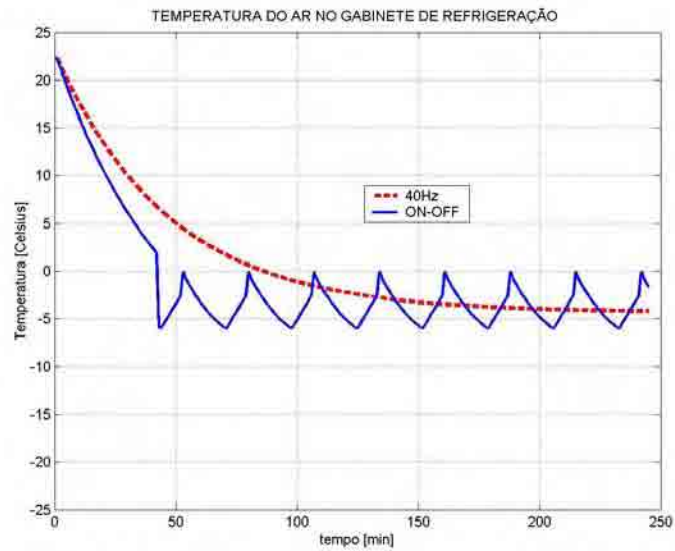


Figuras 35 – Curvas das temperaturas na parede do evaporador no sistema ON-OFF e regime contínuo com frequência de alimentação do motor em 40Hz



Figuras 36 – Curvas das temperaturas do ar do congelador no sistema ON-OFF e regime contínuo com frequência de alimentação do motor em 40Hz

Na figura 37 é apresentado o comparativo entre as curvas calculadas pelas equações simplificadas das temperaturas do sistema ON-OFF e com frequência de alimentação do motor para 40Hz em regime contínuo, do ar no gabinete de refrigeração.



Figuras 37 – Curvas das temperaturas do ar no gabinete de refrigeração do sistema ON-OFF e regime contínuo com frequência de alimentação do motor em 40Hz

7.2 – Resultados obtidos nas simulações do motor de indução monofásico

Com a modulação de velocidade variando em a cada 5 HZ, até 40Hz, tem-se potência elétrica ativa de entrada e fator de potência, conforme se pode observar na tabela 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 – Potência elétrica ativa de entrada em função da variação de velocidade

	Frequência (Hz)				
	60	55	50	45	40
Potência Elétrica Ativa de Entrada (watt)	68,71	65,23	61,84	58,73	56,17

Tabela 9 – Fator de potência em função da variação de velocidade

	Frequência (Hz)				
	60	55	50	45	40
Fator de Potência	0,55	0,57	0,59	0,62	0,65

Tabela 10 – Comparativo de consumo de energia elétrica entre os sistemas ON-OFF e frequência de alimentação reduzida para 40Hz no motor monofásico em regime contínuo

Consumo em 30 dias (Kwh)		
ON-OFF	40Hz	Redução de consumo
43,41	40,44	2,97

Nas figuras 38 e 39 são apresentados os comportamentos da potência elétrica ativa de entrada do motor de indução monofásico com rotor em gaiola e capacitor de partida, variando-se a frequência, conforme tabela 8 e as curvas de conjugado de partida para frequência de alimentação, variando de 40Hz à 60 Hz , aplicada no motor, respectivamente.

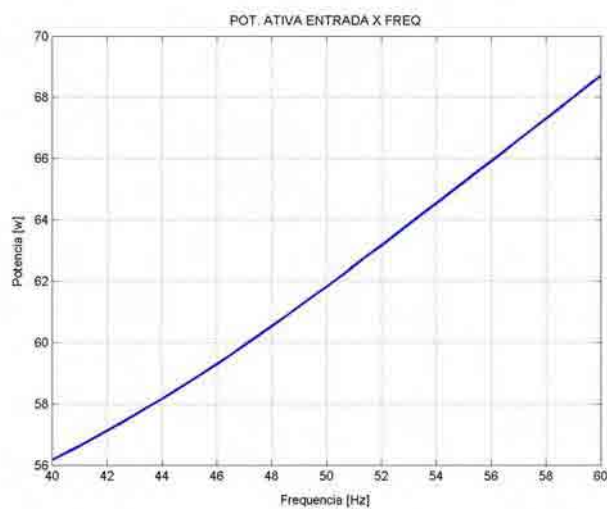


Figura 38 – Comportamento da potência elétrica ativa de entrada em relação à variação de frequência

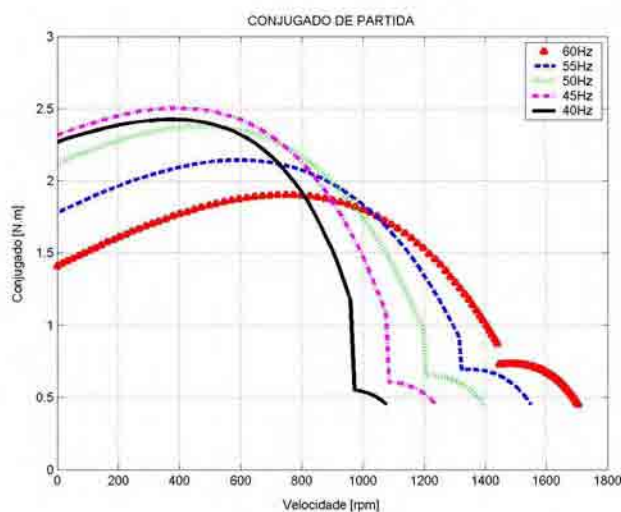


Figura 39 – Conjugado de partida em relação à velocidade

Nas figuras 40 e 41 são apresentadas as curvas da corrente de entrada do motor de indução para frequência de alimentação, variando de 40Hz à 60 Hz e do comportamento do fator de potência, variando-se a frequência, conforme tabela 9, respectivamente.

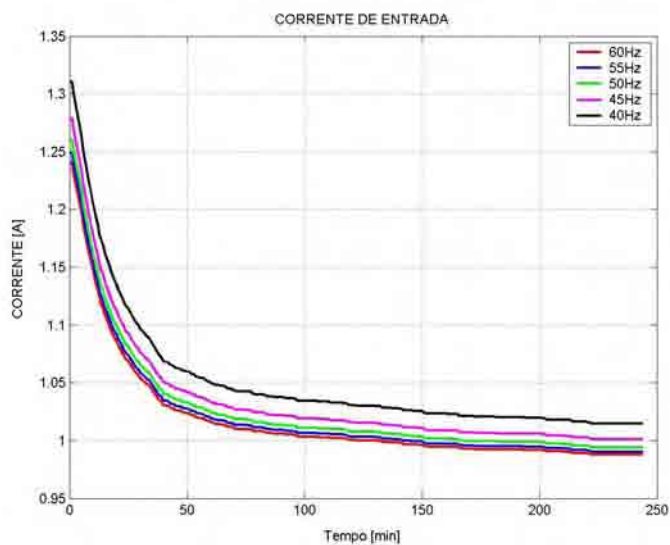


Figura 40 – Corrente de entrada

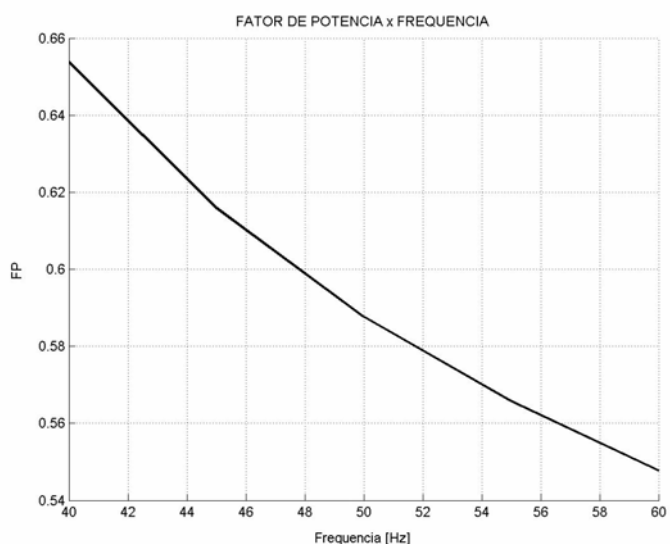
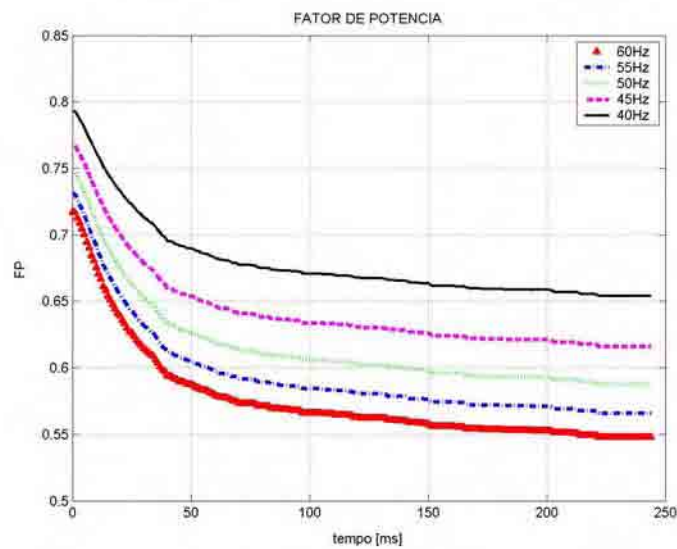
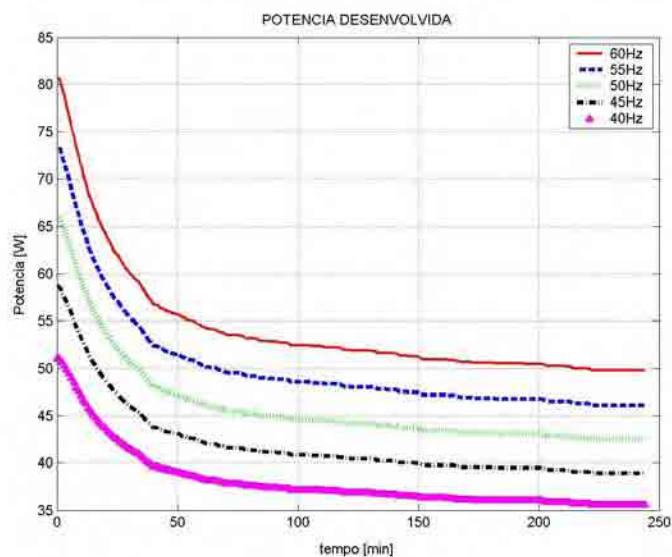


Figura 41 – Comportamento do fator de potência em regime permanente com a variação de velocidade do motor de indução

Nas figuras 42 e 43 são apresentadas as curvas do fator de potência e da potência desenvolvida do motor para variação da frequência de alimentação de 40Hz à 60Hz, respectivamente.

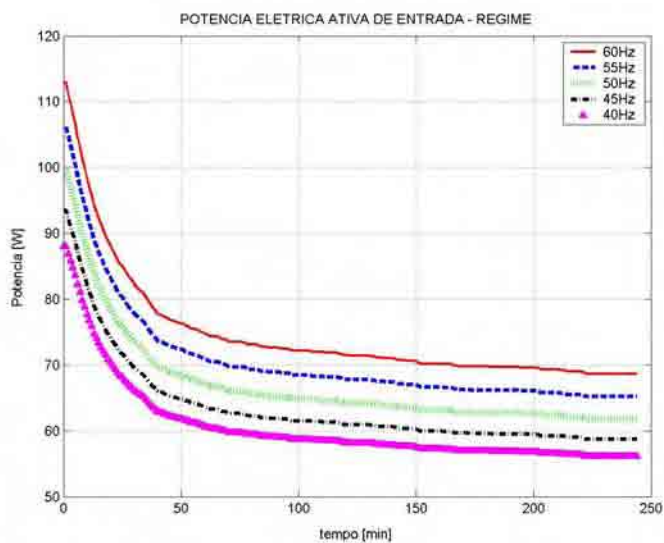


Figuras 42 – Curvas do fator de potência com a variação de velocidade do motor de indução



Figuras 43 – Curvas da potência desenvolvida com a variação de velocidade do motor de indução

Nas figuras 44 e 45 são apresentadas as curvas da potência elétrica ativa de entrada e da velocidade na partida em função do escorregamento do motor para variação da frequência de alimentação de 40Hz à 60Hz, respectivamente.



Figuras 44 – Curvas da potência elétrica ativa de entrada com a variação de velocidade do motor de indução

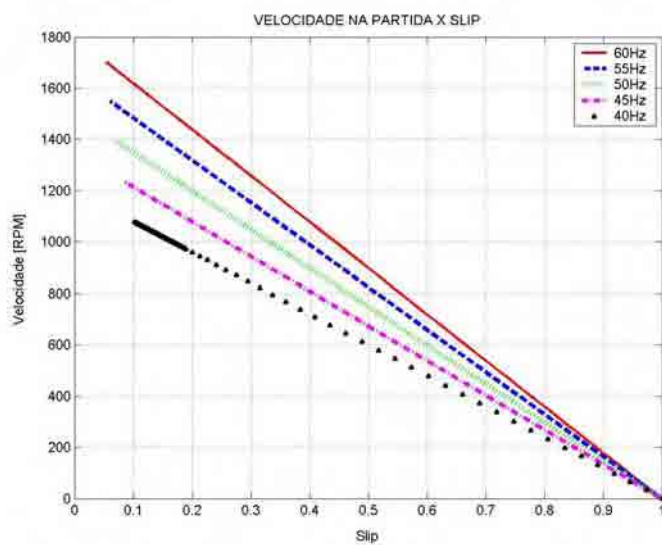


Figura 45 – Velocidade do Motor na Partida em relação ao escorregamento

Na figura 46 é apresentada a curva da velocidade do motor na partida para variação da frequência de alimentação de 40Hz à 60Hz.

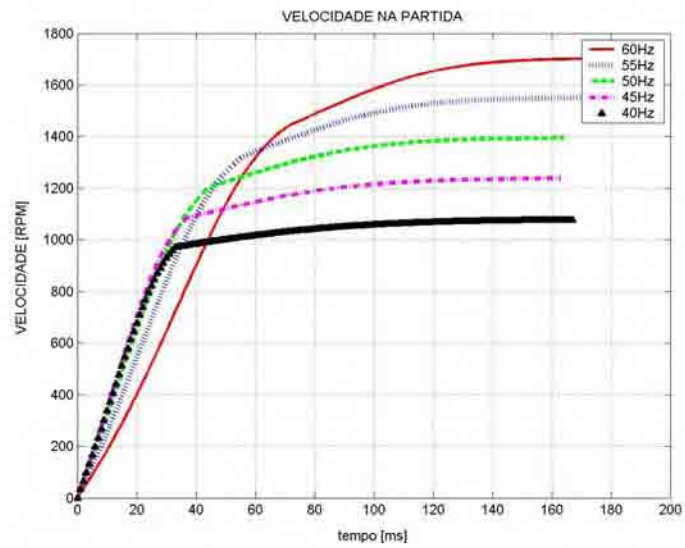


Figura 46 – Velocidade do motor de indução na partida

7.3 –Comentários

Analisando as figuras 31, 38 e 41, observa-se que as temperaturas finais na parede do evaporador, do ar no congelador e do ar no gabinete de refrigeração, potência consumida e fator de potência em regime permanente variam proporcional e linearmente com a variação de velocidade do motor de indução.

Considerando o mesmo conjugado de carga para cada frequência de alimentação do motor de indução monofásico, a corrente de entrada deve permanecer constante, conforme mostrado na figura 40.

Nas figuras 32, 33 e 34, têm-se as curvas das temperaturas na parede do evaporador, do ar do congelador e do ar no gabinete de refrigeração, respectivamente, onde cada curva corresponde a uma frequência de alimentação do motor.

Observa-se nos gráficos das figuras 35, 36 e 37 que para manter a mesma temperatura média no interior do refrigerador, pode-se diminuir a frequência de alimentação do motor de indução monofásico para 40Hz, reduzindo a potência fornecida e conseqüentemente o consumo de energia elétrica em 2,97 Kwh no período de 30 dias, comparando com o funcionamento no sistema convencional ON-OFF, mostrado na tabela 10.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

O trabalho se propôs o desenvolvimento de um modelo matemático simplificado para analisar o comportamento térmico e elétrico de um refrigerador doméstico, quando o sistema motor-compressor for acionado com velocidade variável, baseado apenas nas curvas experimentais das temperaturas de evaporador, freezer e provisão e potência elétrica ativa de entrada.

Através do modelo simplificado apresentado é possível obter o comportamento dinâmico e permanente aproximado das temperaturas do evaporador, freezer e provisão, reduzindo as inúmeras variáveis que compõem o sistema térmico descritas nas leis da termodinâmica.

A disposição dos componentes elétricos do circuito RC proposto neste trabalho conduz de maneira eficaz às equações diferenciais lineares de segunda ordem, semelhantes aos apresentados na literatura atual, com a diferença de que não é necessário o cálculo das constantes térmicas que influenciam o processo.

Com a utilização de resistências e capacitâncias no circuito elétrico apresentado, não é necessário determinar seus valores para dedução das equações diferenciais, pois as mesmas são reduzidas em poucos coeficientes. Isso permite um equacionamento mais simples.

Comparando os resultados apresentados no capítulo 6, verifica-se que as aproximações entre as curvas reais e as curvas geradas pelas equações diferenciais lineares do modelo simplificado são muito próximas.

Os resultados apresentados no capítulo 7 mostram o comportamento das temperaturas e potência elétrica ativa consumida para cada frequência de alimentação aplicada ao motor de indução monofásico com capacitor de partida. O comportamento linear e proporcional mostra que se pode

utilizar facilmente a modulação de velocidade em refrigeradores domésticos para se obter um uso racional da energia elétrica nas residências.

Pode-se concluir que a simplificação do sistema térmico do refrigerador doméstico para um sistema elétrico, por analogia, utilizando componentes passivos, torna o equacionamento mais simples e mostra-se eficiente na sua aplicação, permitindo a análise do comportamento térmico e elétrico de um refrigerador doméstico acionado por velocidade variável.

SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Para trabalhos futuros, propõe-se a análise do comportamento térmico e elétrico do refrigerador doméstico com: 1) desenvolvimento de controle de velocidade implementada com lógica fuzzy, 2) considerar presença de alimentos no interior de cada compartimento e modulação da velocidade do sistema motor-compressor para atingir pontos de equilíbrio, 3) ensaiar refrigeradores domésticos de maior capacidade para confronto de resultados, 4) considerar a curva de conjugado da carga em regime transitório.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

- [1] AVOLIO, E. Uma contribuição ao estudo do comportamento térmico e do desempenho elétrico de motores de indução com rotor em gaiola. Campinas,1992, 180p. Tese (Doutorado em Sistemas e Controle de Energia) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.
- [2] BORTONI, E. C., et al. Sistemas de acionamento: conceito e análise. Vol3. PROCEL, 1999, p.345-365.
- [3] BOYLESTAD, R. L. Introdução à Análise de Circuitos. 8.ed. Prentice-Hall, 1997
- [4] CHOI, B. J., HAN, S. W., HONG, S. K. “Refrigerator Temperature Control Using Fuzzy Logic and Neural Network”, 1998, IEEE
- [5] COLLINS, E.R.Torque and Slip Behavior of Single-Phase Induction Motors Driven from Variable-Frequency Supplies. IEEE, Vol28, 1992.
- [6] DORAN, A. L. Coordinate Selection issues in the Order Reduction of Linear Systems, Control and Dynamic Systems, Vol. 25. Academic Press: New York, 1987.
- [7] EDMINISTER, J. A. Circuitos Elétricos. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1995, 421p.
- [8] FITZGERALD, A. E., et al. Máquinas Elétricas: conversão eletromecânica da energia. Processos, dispositivos e sistemas. São Paulo: McGraw-Hill, 1975, cap.11, p.527-550.

- [9] GARCIA, C. Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos: São Paulo, EDUSP, 1997, 458p.
- [10] HANSELMAN D. C., LITTLEFIELD B. Mastering MATLAB 6: a comprehensive tutorial and reference. New Jersey: Prentice-Hall, 2001, 814p .
- [11] Korean Industrial Standard (KS), “Household electric refrigerators, Refrigerator-Freezers and Freezers”, KSC 9305, 1997
- [12] LAY, D. L. Álgebra Linear e suas aplicações. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.
- [13] Manual de aplicação de compressores ver.01. Joinville: EMBRACO, 2000.
- [14] MARTINGNONI, A., TEIXEIRA, J. S., PERALTA, W. Reparador de Aparelhos Domésticos de Refrigeração. São Paulo: MEC, 1965.
- [15] MATSUMOTO E. Y. MATLAB 6.5: Fundamentos de programação. São Paulo: Érica, 2002, 342p.
- [16] SEN. P. C. Principles of electric machines and power electronics. ISBN 0-471-85084-5, United States of America, 1989, p.377-432.
- [17] SUNAHARA Y., OHSE N., KAWAMURA T., YAMASHITA F. On a Total Electric Power Evaluation for a Refrigerator System Based on a Reduced Model, IECON `88/360
- [18] SWOKOWSKI, E. W. Cálculo com geometria analítica Vol2. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 1994.

- [19] YOUNG, C. M., LIU, C.C, LIU, C. H. Vibration analysis of rolling piston-type compressors driven by single-phase induction motors. IEEE, p.918-923, 1993.