

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO PAULO DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REFRIGERADORES**

JUIZ DE FORA

2016

JOÃO PAULO DA SILVA

## **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REFRIGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gustavo Monteiro Guimarães

Coorientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves

JUIZ DE FORA

2016

da Silva, João Paulo.

Análise do desempenho de refrigeradores / João Paulo da Silva. -  
2016.

74 p.

Orientador: Luiz Gustavo Monteiro Guimarães

Coorientador: Marco Aurélio da Cunha Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade  
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Refrigeradores. 2. Consumo de energia. 3. Eficiência  
energética. I. Guimarães, Luiz Gustavo Monteiro, orient. II. Alves,  
Marco Aurélio da Cunha, coorient. III. Título.

JOÃO PAULO DA SILVA

## **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REFRIGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 29 de junho de 2016.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Gustavo Monteiro Guimarães (Orientador)  
UFJF

---

Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves (Coorientador)  
UFJF

---

Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez  
UFJF

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, em especial minha mãe Renilde, minha irmã Thays e minha avó Luiza Eduarda.

Agradeço também ao corpo docente da Universidade Federal de Juiz de Fora, pela sólida contribuição à minha formação profissional.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Gustavo e ao Prof. Dr. Marco Alves, pelo apoio e orientação para a realização deste trabalho.

Aos colegas e professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

A todos os meus amigos e pessoas que contribuíram de forma positiva em minha vida.

## RESUMO

Ao longo das últimas décadas, ações e programas sobre eficiência energética e redução de perdas de energia têm sido promovidos e desenvolvidos em inúmeros países, principalmente por agências governamentais. Isso é necessário para enfrentar os desafios ambientais e a crescente demanda mundial de energia. No Brasil, temos o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), cuja função é testar e avaliar o desempenho de vários produtos. O refrigerador doméstico, conhecido por ser um dos maiores consumidores de energia nas residências, está entre esses aparelhos testados. Todavia, refrigeradores comerciais não participam deste programa ainda. Este trabalho oferece uma metodologia de baixo custo e simples, que pode ser utilizada tanto em refrigeradores domésticos quanto comerciais para determinar o consumo energético dos refrigeradores em condições ambientes não controladas. O principal resultado deste trabalho foi uma metodologia, que envolve o tempo de atividade do compressor, proposta e validada para corrigir a influência da variação de temperatura ambiente no consumo de energia. Esta metodologia foi utilizada para prever o consumo de energia de um refrigerador a uma temperatura ambiente diferente da ensaiada e para fazer uma previsão mais realista do consumo energético anual de um refrigerador. Além disso, a influência do *pull-down* (abaixamento de temperatura do compartimento interno da geladeira) e a abertura de porta também foram investigadas neste trabalho e, de acordo com os resultados, têm grande influência no consumo de energia.

Palavras-chave: refrigeradores, consumo de energia, eficiência energética.

## **ABSTRACT**

Over the past decades, actions and programs regarding energy efficiency and energy losses reduction have been promoted and developed in plenty of countries, mostly by governmental agencies. This is a need to face environmental challenges and the growing energy demand worldwide. In Brazil, we have the Brazilian Labeling Program (BLP), which is responsible to test and evaluate the performance of several appliances. The household refrigerator, known to be one of the largest energy consumers in houses, is among these appliances. On the other hand, commercial refrigerators have not taken part in this program yet. This work presents a low-cost and simple methodology to determine refrigerators' energy consumption in uncontrolled ambient conditions that can be used in both commercial and household refrigerators. The main result of this work was a methodology involving the compressor run time which was proposed and validated to fix the influence of ambient temperature variations in energy consumption. This methodology was used to predict a refrigerator's energy consumption in a different ambient temperature that the refrigerator was tested as well as to do a more realistic prevision of the annual energy consumption of a refrigerator. Furthermore, the pull-down influence and the door opening condition were also investigated in this work and according to the results they have great influence in energy consumption.

**Keywords:** refrigerators, energy consumption, energy efficiency

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Circuito básico de um refrigerador doméstico.....	20
Figura 2 - Ciclo de refrigeração de Carnot.....	24
Figura 3 - Triângulo das potências .....	31
Figura 4 - Etiqueta PBE e Selo PROCEL .....	33
Figura 5 - Representação esquemática do sistema de aquisição de dados .....	42
Figura 6 - Arduino UNO .....	43
Figura 7 - Sensor de corrente SCT-013-020.....	43
Figura 8 - Sensor de temperatura DS18B20.....	44
Figura 9 - Refrigerador Electrolux Degelo Prático RE28 .....	45
Figura 10 – Esquema da disposição dos sensores (vista superior).....	46
Figura 11 - Medição da potência ativa .....	51



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de eletricidade residencial por equipamento .....	16
Gráfico 2 - Temperatura de saída do compressor versus Temperatura ambiente .....	40
Gráfico 3 - Temperatura do congelador versus Tempo .....	52
Gráfico 4 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio 1) .....	54
Gráfico 5 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio 2) .....	54
Gráfico 6 - Potência Aparente versus Tempo (Abertura periódica de porta) .....	59
Gráfico 7 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio com porta aberta) .....	61
Gráfico 8 - Variação de temperatura mensal de Juiz de Fora (2015) .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias para análise de eficiência energética congeladores e refrigeradores.....	35
Tabela 2 - Retas de consumo padrão das categorias .....	36
Tabela 3 - Temperatura nominal de classificação .....	36
Tabela 4 - Fator correspondente à classificação em estrelas do compartimento congelador ...	37
Tabela 5 - Índices mínimos para agente de expansão de espumas R141b .....	38
Tabela 6 - Índices mínimos para agente de expansão de espumas Ciclopentano.....	38
Tabela 7 - Comparação do consumo entre os dois ensaios .....	52
Tabela 8 - Comparativa do <i>Pull-down</i> entre os dois ensaios.....	53
Tabela 9 - Análise do fator para tempo de 30 minutos (Ensaio 1) .....	56
Tabela 10 - Análise do fator para tempo de 40 minutos (Ensaio 1) .....	56
Tabela 11 - Análise do fator para tempo de 30 minutos (Ensaio 2) .....	56
Tabela 12 - Análise do fator para tempo de 40 minutos (Ensaio 2) .....	56
Tabela 13 - Dados do ensaio com abertura periódica de porta.....	59
Tabela 14 - Dados do ensaio com abertura permanente de porta.....	61
Tabela 15 - Eficiência Energética - Refrigeradores.....	62
Tabela 16 - Consumo mínimo anual.....	66

## **LISTA DE SIGLAS**

DOE - Departament of Energy

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPA - Energy Policy Act

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ITP - Industrial Technologies Program

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PROCEL - Programa de Conservação de Energia Elétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas

a	Coeficiente angular da equação da reta de consumo padrão [kWh/m <sup>3</sup> ]
AV	Volume Ajustado [m <sup>3</sup> ]
b	Coeficiente linear da equação da reta de consumo padrão [kWh]
C	Consumo [kWh]
COP	Coeficiente de performance [adimensional]
Cp	Consumo padrão [kWh]
f	Fator correspondente à temperatura nominal de classificação [adimensional]
FP	Fator de potência [adimensional]
I	Corrente elétrica [A]
IE	Índice de Eficiência Energética [adimensional]
P	Potência ativa [W]
q	Carga elétrica [C]
Q	Potência reativa [VAR]
S	Potência aparente [VA]
t	Tempo [s]
T	Temperatura [°C]
Tc	Temperatura nominal de classificação [°C]
Tr	Temperatura nominal do refrigerador [°C]
U	Tensão [V]
Vc	Volume do compartimento congelador [m <sup>3</sup> ]
Vr	Volume do refrigerador [m <sup>3</sup> ]
W	Energia [J]

### **Letras gregas**

$\Delta$	Diferença
$\varepsilon$	Erro relativo percentual [%]
$\theta$	Ângulo de fase
$\kappa$	Fator de correção do consumo [kWh/°C]
$\varphi$	Ângulo formado pelos vetores Potência Aparente e Potência Ativa

### **Subscritos**

i	Corrente
v	Tensão
corr.	Corrigido
prev.	Previsto

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações Iniciais .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Escopo do Trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>O Refrigerador .....</b>	<b>20</b>
2.1.1	Gabinete .....	21
2.1.2	Compressor hermético.....	21
2.1.3	Evaporador .....	21
2.1.4	Condensador .....	22
2.1.5	Tubo capilar.....	22
2.1.6	Filtro secador.....	22
2.1.7	Controle de temperatura do refrigerador.....	23
<b>2.2</b>	<b>O Ciclo de Compressão a Vapor .....</b>	<b>23</b>
2.2.1	Ciclo de refrigeração de Carnot.....	23
2.2.2	O coeficiente de performance (COP) .....	24
2.2.3	O ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor .....	25
2.2.4	O ciclo real de refrigeração .....	26
<b>2.3</b>	<b>Grandezas Elétricas.....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Corrente e tensão.....	28
2.3.2	Energia e potência.....	29
2.3.3	Potência em regime senoidal .....	29
2.3.4	Fator de potência .....	31
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>32</b>

3.1	Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) .....	32
3.2	Procel .....	32
3.3	Metodologia do Cálculo de Eficiência Energética de Refrigeradores utilizada pelo PBE.....	33
3.4	Estudos sobre o Desempenho Energético de Refrigeradores .....	38
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1	Construção do Sistema de Aquisição de Dados .....	42
4.2	Procedimentos Experimentais .....	44
4.3	Metodologia Proposta para a Correção da Variação de Temperatura Ambiente	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	50
5.1	Ensaio de Consumo Mínimo Diário .....	50
5.2	Cálculo do Fator $\kappa$ com base nos Valores Experimentais .....	55
5.3	Ensaio sob a Influência de Abertura Periódica de Porta .....	58
5.4	Ensaio com Abertura Permanente de Porta .....	60
5.5	Comparação dos Resultados Obtidos com o Resultado do Teste do Inmetro.....	62
5.6	Proposta para um Método de Estimativa de Consumo Energético mais Próximo da Realidade .....	64
6.	CONCLUSÕES .....	67
	APÊNDICE 1 – PROGRAMAÇÃO DO ARDUiNO.....	71
	ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE .....	74

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Iniciais**

Neste trabalho busca-se desenvolver uma metodologia que permita a análise do desempenho de refrigeradores, tanto de uso doméstico como de uso comercial. A abordagem para tratar o desempenho de um refrigerador terá como foco o consumo de energia como parâmetro majoritário. O trabalho foi desenvolvido para verificar o desempenho de refrigeradores no local onde serão utilizados, de forma que se possa fazer uma avaliação nas condições reais as quais são submetidos estes equipamentos durante seus regimes de funcionamento. Espera-se com isso elaborar uma metodologia de ensaios facilmente replicáveis, visto que não é necessário fazer o uso de câmaras com condições ambientes controladas como exigido pelas normas, o que representa muitas vezes uma barreira para a realização de ensaios de equipamentos deste tipo, devido aos altos custos envolvidos.

### **1.2 Motivação**

A energia, em seus mais diversos empregos, sempre foi de extrema importância para a atividade econômica de um país e também para a qualidade de vida das pessoas. Contudo, sua obtenção gera impactos econômicos e ambientais para a sociedade.

Nas últimas décadas, foi observado um crescimento de ações e programas para promover a eficiência energética, a fim de conscientizar a sociedade para um uso mais racional da energia elétrica, de modo a evitar desperdícios e fomentar processos e produtos mais eficientes.

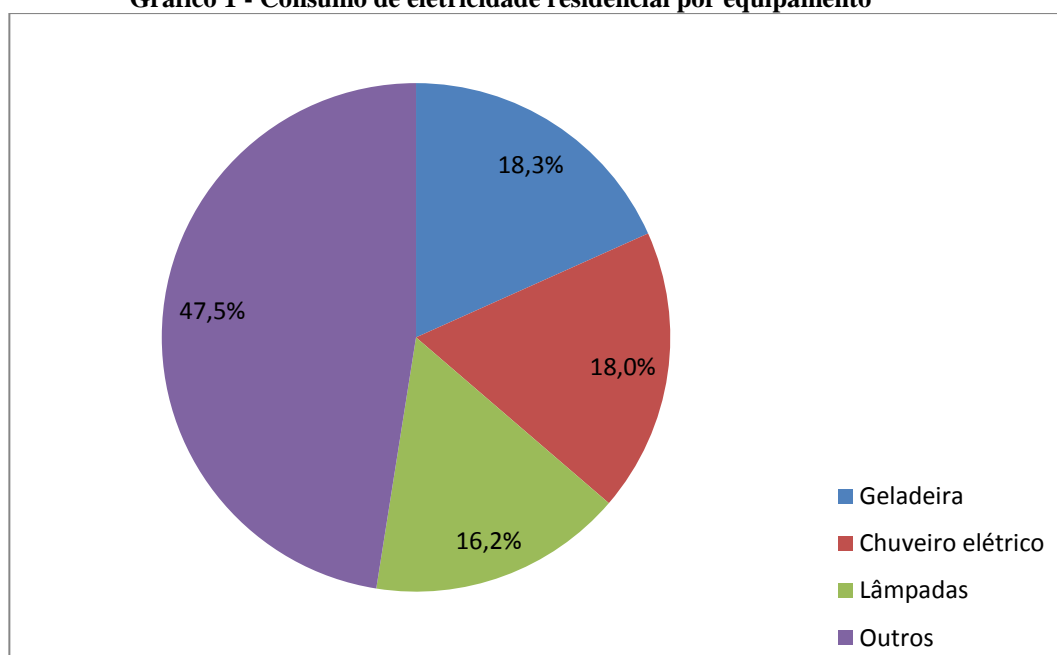
Bajay (2010) destaca no âmbito industrial o Programa Tecnológico Industrial (Industrial Technologies Program – ITP), realizado pelo Departamento de Eficiência Energética e Energias Renováveis, que é vinculado ao Departamento de Energia (DOE) do governo americano. Este programa tem o objetivo melhorar a eficiência energética industrial e atenuar os impactos das atividades industriais no meio ambiente.



No Brasil, especificamente, temos o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), que com a lei nº 10.295 (Lei da Eficiência Energética), publicada em 17 de outubro de 2001, passou a avaliar de forma compulsória o consumo de energia e a eficiência de máquinas e equipamentos consumidores de energia, para que estes estejam em conformidade com a regulamentação (BRASIL, 2001).

Entre estes produtos que são submetidos aos testes de consumo e eficiência, se encontram os refrigeradores domésticos. Entre os eletrodomésticos mais comuns, a geladeira é o item responsável pelo maior consumo elétrico nos domicílios (EPE, 2014). Sendo assim, o estudo do consumo e da eficiência energética de refrigeradores é de grande relevância, dada a significativa parcela de consumo que representam, conforme é mostrado no Gráfico 1.

**Gráfico 1 - Consumo de eletricidade residencial por equipamento**



**Fonte: Adaptado de EPE, 2014**

No entanto, não existe uma regulamentação no Brasil que estabelece a obrigatoriedade da submissão de refrigeradores comerciais a ensaios avaliativos do desempenho. Diante desse cenário, algumas empresas, de forma deliberada, não submetem seus produtos a ensaios de desempenho, que não somente trazem informações importantes para os clientes, mas também servem de base para que haja um estímulo contínuo ao desenvolvimento e melhoria dos produtos.

Nos EUA, por exemplo, desde o Energy Policy Act (EPA), publicado em 2005, o DOE (Department of Energy) tem buscado criar normas para diversos produtos, entre os quais estão os refrigeradores comerciais e freezers, que foram regulamentados em 1 de janeiro de 2010. Novas normas foram publicadas em fevereiro de 2014 e entraram em vigor em março de 2017. Estas novas normas, segundo estimativa do US. Department of Energy, diminuirão a emissão de dióxido de carbono em 142 milhões de toneladas métricas, durante o período de 2017-2046. Estima-se que essas normas acarretaram em uma economia de 11.7 bilhões de dólares nas contas de energia (U.S. Department of Energy, 2016).

A regulamentação, que por um lado impulsiona os fabricantes a conseguir níveis cada vez mais altos de eficiência e menores consumos de energia, também pode representar uma grande barreira para empresas de pequeno e médio porte do segmento de refrigeradores comerciais. Uma das dificuldades para a regulamentação dos refrigeradores comerciais é o fator econômico, representado pelos altos custos envolvidos em ensaiar equipamentos em ambientes controlados, o que é requerido pelas normas técnicas. Como muitas destas empresas não produzem os equipamentos em larga escala, seja pela sua capacidade produtiva ou por fabricarem equipamentos customizados, submeter seus produtos a ensaios de altos custos é inviável economicamente.

No entanto, a falta de uma regulamentação no segmento de refrigeradores comerciais faz com que a preocupação com o consumo de energia e a eficiência dos equipamentos seja negligenciada, prática esta que traz algumas consequências onerosas, principalmente para o cliente.

Uma possível solução para esta problemática é a elaboração de metodologias simples e menos onerosas de ensaios de desempenho de refrigeradores, que permita uma maior acessibilidade ao estudo do consumo de energia destes equipamentos, o que é importante para a evolução do segmento de refrigeradores comerciais, principalmente para as pequenas e médias empresas. Isso pode trazer consequências positivas, como o desenvolvimento dos produtos neste segmento, além de possibilitar uma informação de consumo energético senão exata, ao menos razoável ao consumidor.

### **1.3 Escopo do Trabalho**

A análise de desempenho global de um refrigerador, utilizando o consumo energético como parâmetro, pode ser feita através da medida da potência consumida pelo aparelho ao longo do tempo em que ele permanece em operação. A abordagem usual para analisar o desempenho de um refrigerador como um todo se dá por meio de ensaios normalizados, que são feitos em câmaras com ambiente externo controlado. Busca-se aqui uma alternativa a esses ensaios, mediante a criação de uma metodologia para analisar estes equipamentos em condições normais de funcionamento, isto é, não controladas. Os ensaios foram realizados em um refrigerador doméstico, mas podem ser facilmente reproduzidos em refrigeradores comerciais.

### **1.4 Objetivos**

O presente trabalho visa desenvolver uma metodologia de ensaio, de baixo custo, que permita avaliar o consumo de refrigeradores domésticos e também dos comerciais.

Para isso, serão analisadas metodologias utilizadas em âmbito nacional para a avaliação compulsória de desempenho dos refrigeradores domésticos e será feito um estudo de ensaios relativos ao desempenho de refrigeradores, através de uma revisão bibliográfica.

Como os ensaios são conduzidos em um ambiente externo não controlado, busca-se no trabalho uma forma de tratar a influência da variação da temperatura ambiente, que é um fator preponderante no consumo energético dos refrigeradores.

Um objetivo secundário do trabalho é estimular o interesse dos órgãos competentes e também dos produtores de refrigeradores comerciais nas questões relativas à transparência de informações, como a eficiência e o consumo dos equipamentos. Cabe salientar que ao contrário dos refrigeradores domésticos, onde as informações de consumo e eficiência são compulsórias, ainda não há uma regulamentação nacional para refrigeradores comerciais que traz à luz estas informações de grande relevância para os clientes.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi desenvolvido ao longo de cinco capítulos, a saber: “Fundamentos Teóricos”; “Revisão Bibliográfica”; “Materiais e Métodos”; “Resultados e Discussões” e “Conclusões”.

O segundo capítulo do trabalho, “Fundamentos Teóricos”, traz as informações básicas necessárias para um melhor entendimento dos refrigeradores, tais como o funcionamento dos principais componentes de refrigeradores, ciclos termodinâmicos e algumas grandezas elétricas.

O terceiro capítulo deste trabalho é a “Revisão Bibliográfica”, que apresenta o método utilizado nacionalmente para avaliação de refrigeradores domésticos e alguns estudos sobre o desempenho de refrigeradores.

O quarto capítulo, “Materiais e Métodos”, contempla a caracterização do aparato experimental utilizado, assim como os procedimentos adotados nos ensaios e uma proposta de metodologia para corrigir o efeito da variação de temperatura ambiente no consumo. .

O capítulo posterior, “Resultados e Discussões”, tem o propósito de trazer à tona os resultados dos experimentos e fazer uma análise qualitativa e quantitativa dos mesmos. No mesmo capítulo, é testada e validada a metodologia para corrigir o efeito da variação de temperatura, apresentada no capítulo anterior.

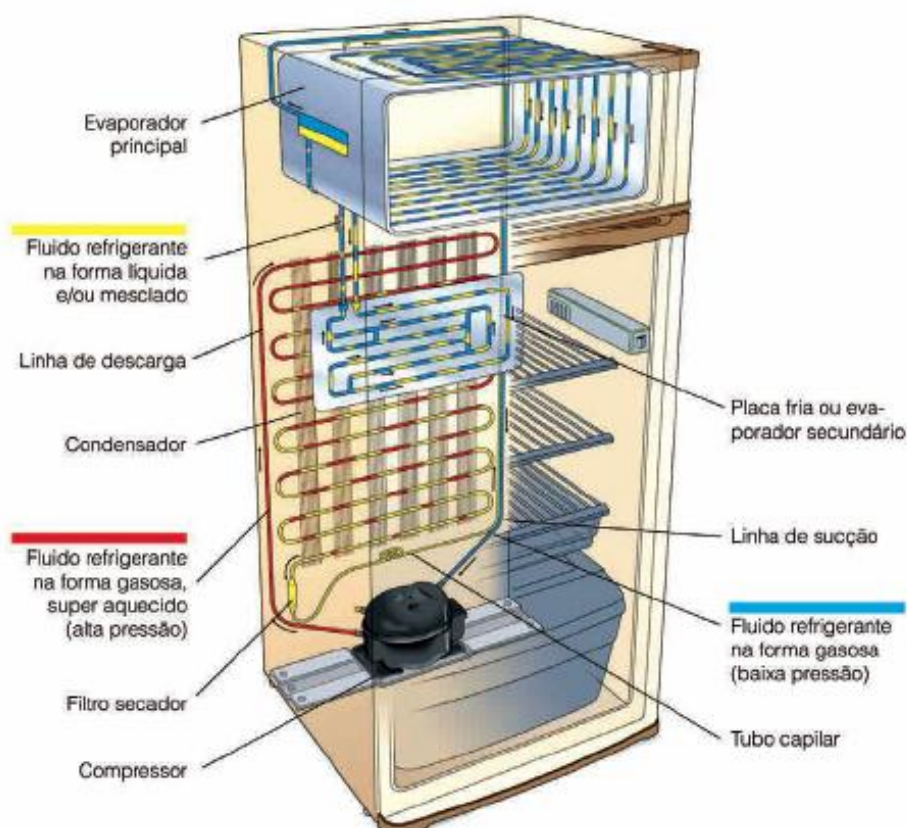
O último capítulo, “Conclusões” tem o intuito de apresentar de maneira sintética as conclusões obtidas com base nos resultados.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 O Refrigerador

O refrigerador é uma máquina térmica composta basicamente por um gabinete e um sistema de refrigeração, cuja finalidade é a remoção de calor do interior deste gabinete, de modo a manter a temperatura no interior deste gabinete menor do que a temperatura do ambiente o qual o refrigerador se situa. Devido a esta capacidade, refrigeradores são utilizados amplamente em ambientes domésticos e comerciais para a conservação de alimentos e bebidas, além de ser muito importante na estocagem de medicamentos, onde o controle de temperaturas é bastante rígido. O tipo de sistema mais utilizado nos refrigeradores domésticos e comerciais tem como base a compressão mecânica de vapor. A Figura 1 ilustra o circuito de um refrigerador doméstico comum:

**Figura 1- Circuito básico de um refrigerador doméstico**



Fonte: ([www.clubedarefrigeracao.com.br](http://www.clubedarefrigeracao.com.br))

A seguir, será feito uma breve descrição dos principais componentes que constituem o refrigerador doméstico.

### 2.1.1 Gabinete

Segundo Carneis (2002) os gabinetes formam e dão sustentação à estrutura do refrigerador, sendo disponibilizados em diferentes volumes. Geralmente a profundidade e a largura são aproximadamente uniformes, ressalva feita aos refrigeradores *slims*. Entretanto a altura varia conforme a capacidade (volume) do refrigerador.

### 2.1.2 Compressor hermético

O compressor é um dispositivo movido por um motor elétrico, cuja função é puxar o refrigerante vaporizado do evaporador e o comprimir em um volume pequeno a uma alta temperatura. Desse modo o compressor também separa o ciclo em lados de alta pressão e baixa pressão (CARMEIS, 2002).

O tipo mais comum de compressor utilizado em refrigeradores domésticos são os compressores recíprocos (pistão-cilindros).

### 2.1.3 Evaporador

O evaporador é situado na parte superior do gabinete e separa o compartimento dos alimentos congelados dos alimentos frescos. A evaporação do fluido refrigerante no evaporador propicia a absorção de calor requerida pelo gabinete. Através das correntes de convecção, o calor é retirado de todos os compartimentos do refrigerador (CARMEIS, 2002).

#### 2.1.4 Condensador

O condensador no refrigerador doméstico está posicionado na parte traseira e é composto por tubos finos de metal (serpentina). O contato direto com o meio ambiente proporciona uma circulação de ar. O fluido refrigerante circula pela serpentina, transferindo calor para o meio ambiente.

Este sistema apresenta uma baixa eficiência na troca de calor, mas tem um baixo custo de manutenção e operação (CARMEIS, 2002).

#### 2.1.5 Tubo capilar

O tubo capilar é o dispositivo de expansão mais utilizado em sistemas de pequena capacidade (VENTURINI; PIRANI, 2005). Logo, este dispositivo é utilizado nas geladeiras.

Esse dispositivo consiste num tubo de pequeno diâmetro, com determinado comprimento, que liga a saída do condensador com a entrada do evaporador. Através de seu pequeno diâmetro, o tubo capilar fornece resistência à passagem do fluido refrigerante, que faz com que a pressão do refrigerante (no estado líquido) se abaixe ao passar por ele.

#### 2.1.6 Filtro secador

O filtro secador é um acessório que tem a forma de um tanque, cuja função é reter a umidade, a sujeira, os metais, as partículas estranhas, impedindo-as de se incorporarem ao fluxo de refrigerante. A nocividade da umidade advém do fato de que quando se combina ao óleo em um sistema, forma uma lama ácida que corrói as unidades herméticas (PORTASIO, 1982 apud SILVA JR, 2005).

### 2.1.7 Controle de temperatura do refrigerador

O compressor é periodicamente ligado e desligado para manter o refrigerador dentro de um limite de temperatura. O comando para o acionamento do compressor é dado pelo termostato, que é colocado sobre o evaporador para que possa garantir sua baixa temperatura interna. Tecnicamente é chamado de controle *on-off* (liga-desliga), já que sistemas de refrigeração populares são desligados completamente quando o limite de temperatura mínimo é atingido ( VENDRUSCULO et al., 2003).

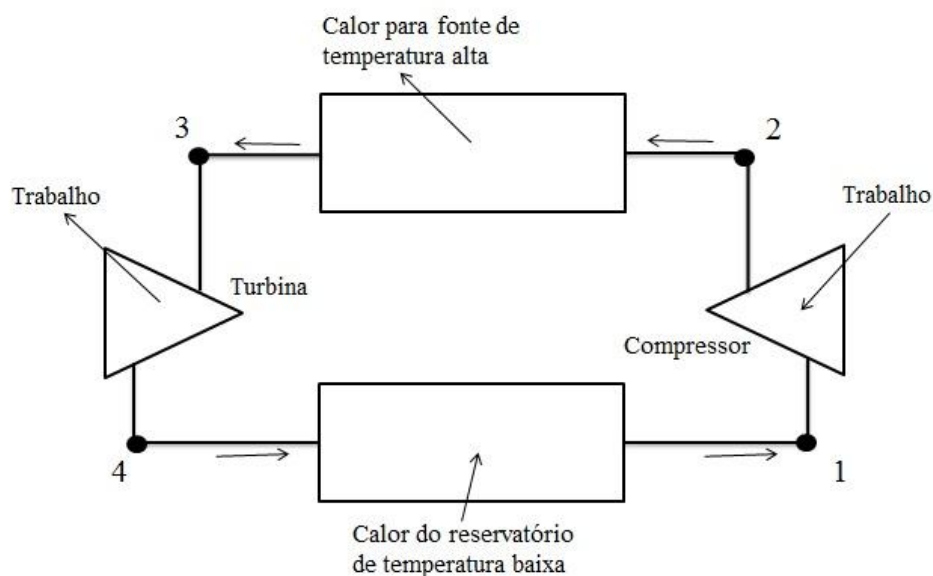
## 2.2 O Ciclo de Compressão a Vapor

### 2.2.1 Ciclo de refrigeração de Carnot

O ciclo de Carnot é aquele cujo rendimento é máximo para duas temperaturas dadas. No ciclo de refrigeração, ocorre uma transferência de energia térmica de um nível mais baixo de temperatura para um nível mais alto de temperatura (STOECKER; JONES, 1985). É necessário um trabalho externo para efetuar a operação deste ciclo, já que esse processo não é espontâneo. Um esquema representativo deste ciclo é exposto na Figura 2:



**Figura 2 - Ciclo de refrigeração de Carnot**



**Fonte: Elaborado pelo próprio autor**

O ciclo de Carnot, representado na Figura 2, é constituído de quatro processos reversíveis, que são:

- 1-2: Compressão adiabática;
- 2-3: Rejeição isotérmica de calor;
- 3-4: Expansão adiabática;
- 4-1: Recebimento isotérmico de calor.

O objetivo do ciclo é a realização do processo 4-1, onde há a retirada de calor da fonte fria. A necessidade de estudar o Ciclo de Carnot de Refrigeração mesmo sendo um ciclo ideal advém da possibilidade de ser usado como estimativa das temperaturas que produzem eficiências máximas e também de ser usado como referência (STOECKER; JONES, 1985).

### 2.2.2 O coeficiente de performance (COP)

Para avaliar o desempenho de um ciclo de refrigeração, é definida uma grandeza que avalia sua eficiência. Nos ciclos frigoríficos, esta grandeza é denominada coeficiente de performance (também chamada de coeficiente de eficácia) e é definida pela Equação 1:

$$\text{COP} = \frac{\text{refrigeração útil}}{\text{trabalho líquido}} \quad (1)$$

O ciclo de refrigeração de Carnot, como foi dito previamente, produz a máxima eficiência para dadas temperaturas e seu COP pode ser representado pela equação a seguir:

$$\text{COP} = \frac{T_1(s_1-s_4)}{(T_2-T_1)(s_1-s_4)} = \frac{T_1}{T_2-T_1} \quad (2)$$

Onde:

$T_1$  = Temperatura na entrada do compressor

$T_2$  = Temperatura na saída do compressor

$s_1$  = Entropia na entrada do compressor

$s_4$  = Entropia na saída da turbina

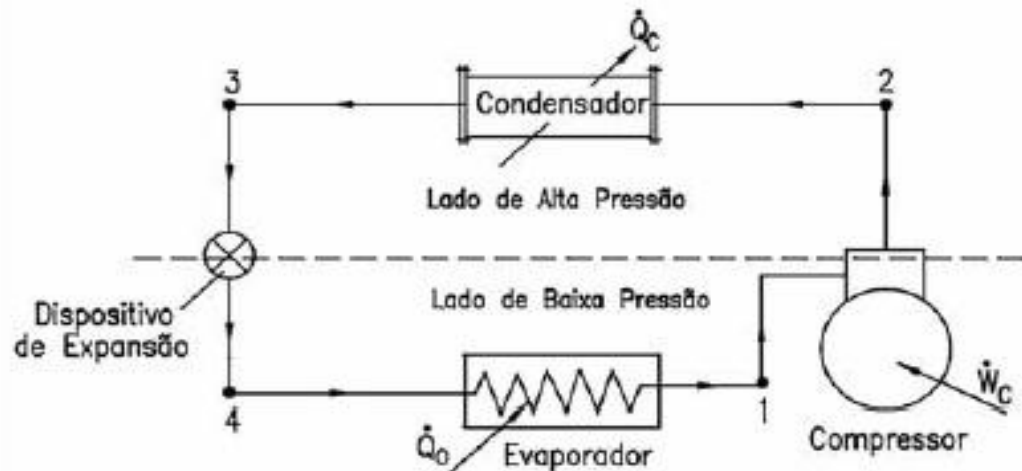
### 2.2.3 O ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor

Embora o ciclo de Refrigeração de Carnot ofereça a maior eficiência, existem dois motivos que acarretam dificuldades para a construção de sistemas que operam segundo este ciclo na prática.

A primeira dificuldade se encontra no processo de compressão, onde uma mistura bifásica (líquido e vapor) é comprimida isentropicamente no compressor. Esta compressão, denominada compressão úmida, é uma grande barreira para compressores alternativos, que são danificados devido à presença de gotículas de líquido. Logo, uma compressão seca é mais adequada para a construção de um ciclo teórico mais fiel à realidade. Outra dificuldade observada no ciclo de Carnot é a utilização de uma turbina, visto que o trabalho extraído do sistema na expansão isentrópica é tão baixo que torna a utilização de uma turbina no sistema inviável economicamente, na maioria dos casos. A turbina então é substituída por um dispositivo de expansão, onde ocorre um processo irreversível isentálpico (REFRIGERATION & AIR CONDITIONING, 2016).

A partir dessas considerações, é construído o ciclo teórico por compressão de vapor, que pode ser observado na Figura 3:

**Figura 3 - Ciclo Teórico de Refrigeração por Compressão de Vapor**



Fonte: VENTURINI; PIRANI, 2005

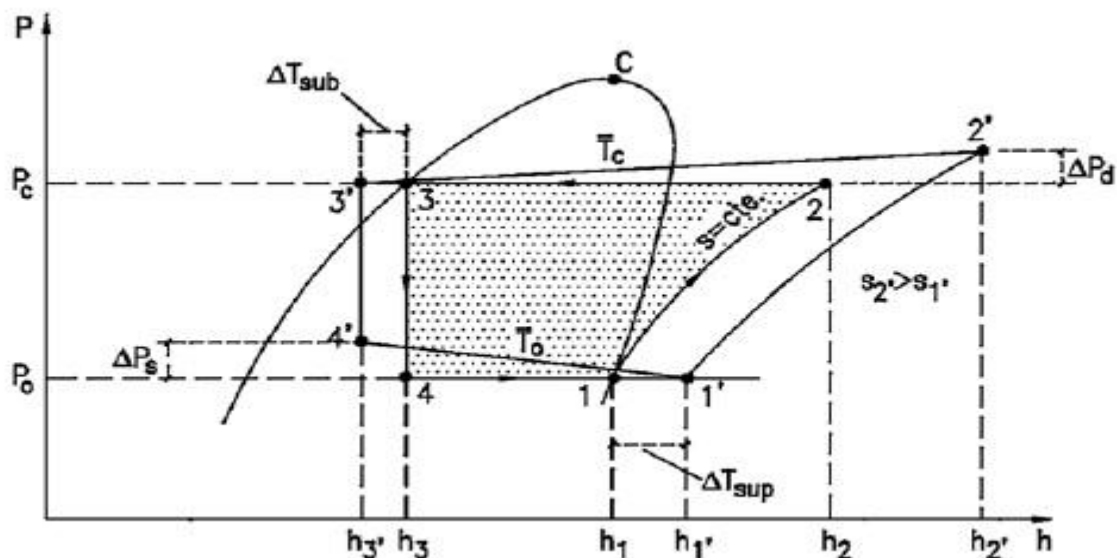
O ciclo acima é constituído por quatro processos termodinâmicos:

- 1-2: Compressão isentrópica de vapor saturado no compressor;
- 2-3: Rejeição isotérmica de calor no condensador;
- 3-4: Expansão isentálpica de líquido saturado no dispositivo de expansão;
- 4-1: Recebimento isotérmico de calor no evaporador.

#### 2.2.4 O ciclo real de refrigeração

O ciclo real de refrigeração tem algumas diferenças significativas para o ciclo teórico de refrigeração. As principais diferenças destes dois ciclos podem ser observadas na Figura 4, que representa o diagrama Pressão x Entalpia do ciclo padrão e do ciclo real.

Figura 4 - Diagrama P-h do ciclo teórico e do ciclo real



Fonte: VENTURINI; PIRANI, 2005

Na Figura 4, podemos observar o diagrama P-h do ciclo teórico representado pelo ciclo 1-2-3-4. Já o ciclo real é representado pelo ciclo 1'-2'-3'-4'.

As perdas de cargas que ocorrem nas tubulações são representadas por  $\Delta P_d$  (perda de carga na linha de descarga do compressor) e  $\Delta P_s$  (perda de carga na linha de sucção do compressor).

O superaquecimento do fluido refrigerante, representado por  $\Delta T_{sup}$ , é outro fenômeno muito importante que ocorre no ciclo real. Isso se deve ao fato do superaquecimento prevenir a entrada de gotículas de líquido no compressor, já que o compressor vai receber vapor superaquecido e não vapor saturado, como nos ciclos teóricos (VENTURINI; PIRANI, 2005).

Outro aspecto que é considerado no ciclo real é o subresfriamento do fluido refrigerante, representado por  $\Delta T_{sub}$  na saída do condensador, que aumenta o efeito refrigerante sem a adição de trabalho e garante que somente fluido refrigerante na forma de líquido entre no dispositivo de expansão (VENTURINI; PIRANI, 2005).

## 2.3 Grandezas Elétricas

### 2.3.1 Corrente e tensão

Em circuitos elétricos, a separação entre cargas dá origem uma força elétrica (tensão) e seu movimento dá origem a um fluxo elétrico (corrente). Quando cargas positivas e negativas estão separadas, há gasto de energia (NILSSON; RIEDEL, 2009).

A tensão é a energia por unidade de carga criada pela separação e pode ser expressa como:

$$U = \frac{W}{q} \quad (3)$$

Onde:

$U$  = Tensão, em volts [V]

$W$  = Energia, em joules [J]

$q$  = Carga elétrica, em coulombs [C]

As cargas em movimento provocam efeitos elétricos, que são dependentes da variação temporal de carga. Esta variação temporal de carga é designada corrente elétrica (NILSSON; RIEDEL, 2009). A corrente elétrica pode ser calculada através da Equação 4:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde:

$I$  = Corrente elétrica, em ampères [A]

$\Delta q$  = Carga elétrica, em coulombs [C]

$\Delta t$  = Intervalo de tempo, em segundos [s]

### 2.3.2 Energia e potência

A energia é o potencial de um sistema realizar um trabalho. A potência pode ser definida como a taxa de variação temporal do gasto ou da absorção de energia (NILSSON; RIEDEL, 2009). A potência instantânea pode ser relacionada com a tensão e corrente através da seguinte equação:

$$P = UI \quad (5)$$

Onde:

P = Potência, em watts [W]

U = Tensão, em volts [V]

I = corrente, em ampères [A]

### 2.3.3 Potência em regime senoidal

Sistemas elétricos que geram, geram transmitem e distribuem energia são projetados para funcionar em regime permanente senoidal. Logo a corrente e tensão desses sistemas são alternadas, pois variam de forma senoidal.

Denominamos potência média ou ativa, a grandeza elétrica que mede o valor médio da potência instantânea em um determinado período de tempo. Ela é a potência que é convertida de uma forma elétrica para uma forma não-elétrica, sendo assim ela realiza trabalho em um sistema (NILSSON; RIEDEL, 2009).

A equação que representa a potência ativa é a seguinte:

$$P = UI \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (6)$$

Onde:

P = Potência ativa, em watts [W]

U = Tensão, em volts [V]

$I$  = Corrente, em ampères [A]

$\theta_v$  = ângulo de fase da tensão

$\theta_i$  = ângulo de fase da corrente

A potência reativa é uma grandeza elétrica que representa a potência que não é convertida em formas não-elétricas de energia e, portanto, não gera trabalho. A potência reativa não é dissipada, e sim armazenada, seja no campo magnético de um indutor ou no campo elétrico de um capacitor. Sua unidade é o Volt-Ampère Reativo (VAR) e ela é representada pela seguinte equação:

$$Q = UI \cdot \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (7)$$

Onde:

$Q$  = Potência reativa, em Volt-Ampère Reativo [VAR]

$U$  = Tensão, em volts [V]

$I$  = Corrente, em ampères [A]

$\theta_v$  = ângulo de fase da tensão

$\theta_i$  = ângulo de fase da corrente

O módulo da soma quadrática da potência ativa e da potência reativa é chamado de potência aparente, cuja unidade é o Volt-Ampère (VA). A potência aparente representa a potência total disponível para prover a potência média (ativa), que é necessária para realizar trabalho (NILSSON; RIEDEL, 2009). A Equação 8 é utilizada para o cálculo da potência aparente:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (8)$$

Onde:

$S$  = Potência Aparente, em Volt-Ampère [VA]

$P$  = Potência Ativa, em watts [W]

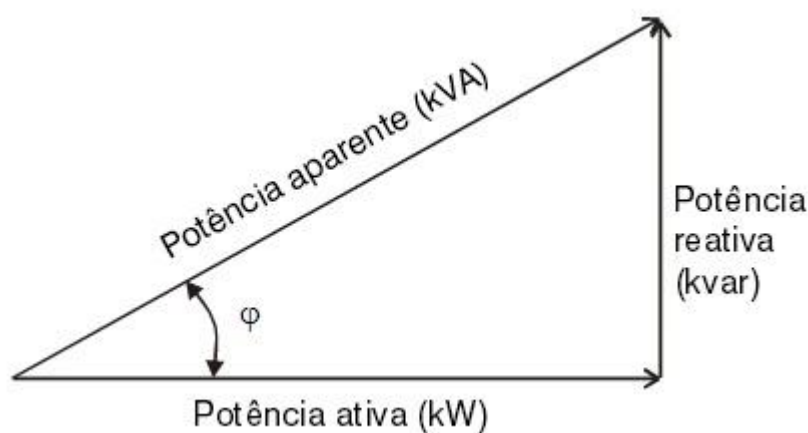
$Q$  = Potência Reativa, em Volt-Ampère Reativo [VAR]

### 2.3.4 Fator de potência

Grande parte das cargas nas unidades consumidoras consome carga reativa indutiva, como motores, transformadores, fornos de indução, entre outros. Como é necessário um campo elétrico para seu funcionamento, estas cargas consomem, em sua operação, tanto potência ativa (que realiza trabalho) quanto potência reativa (para criar e manter os campos eletromagnéticos destas cargas).

O fator de potência é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Ele é um indicador da eficiência do uso da energia, de modo que um alto fator de potência indica uma eficiência alta e um baixo fator de potência indica uma eficiência baixa (WEG, 2015). As relações entre as potências e o fator de potência podem ser representadas pelo triângulo das potências, mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Triângulo das potências



Fonte: WEG, 2015

O fator de potência pode ser calculado a partir da expressão abaixo:

$$FP = \frac{\text{Potência ativa}}{\text{Potência aparente}} = \cos \varphi \quad (9)$$



### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)**

O PBE é um programa coordenado pelo Inmetro, cujo objetivo é trazer informações para o consumidor sobre o desempenho dos produtos disponíveis no mercado. Assim, este programa ajuda os consumidores a tomar decisões sobre qual produto comprar de maneira mais consciente. Uma consequência deste programa é o fomento à competitividade dos fabricantes, onde a melhoria contínua de seus produtos e processos de fabricação visa atrair a atenção dos consumidores e assim obter um maior sucesso comercial.

#### **3.2 Procel**

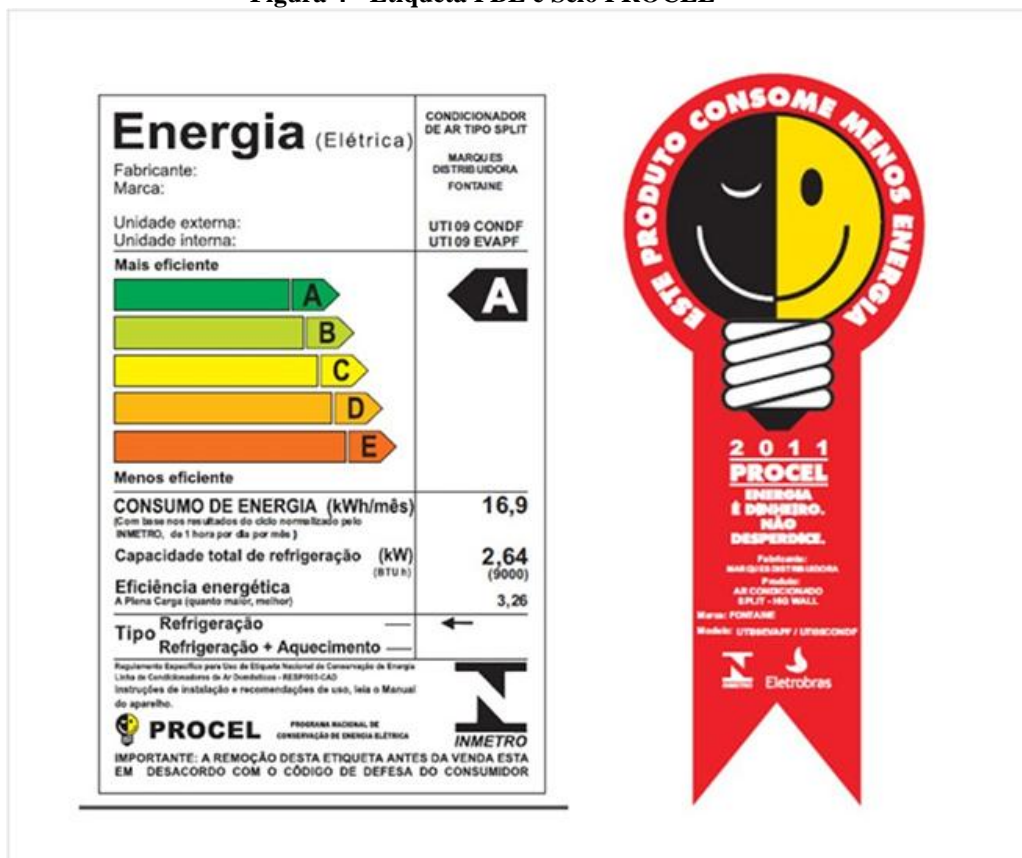
O Programa Brasileiro de Conservação de Energia Elétrica – Procel foi instituído em 30 de dezembro de 1985. Ele é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobras. Sua finalidade é a promoção do uso eficiente da energia elétrica e o combate ao seu desperdício. Este programa, através de suas ações, contribui para a eficiência de bens e serviços, além de possibilitar a postergação de investimentos no setor elétrico e a redução da emissão de gases poluentes ao meio ambiente. No ano de 2015, o Procel estimou uma economia de energia da ordem de 11,680 bilhões de kWh, valor correspondente à cerca de 2,5% do consumo total de eletricidade do Brasil neste ano (ELETROBRAS, 2016).

Através de Decreto Presidencial, foi instituído o Selo Procel de Economia de Energia, que é um produto desenvolvido e concedido pelo Procel. “O Selo Procel tem por objetivo principal identificar os produtos que apresentem os melhores níveis de eficiência energética em uma dada categoria de equipamentos, motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar produtos mais eficientes” (ELETROBRAS, 2013, p.3).

Em relação à sua abrangência, o Selo Procel, exibido na Figura 4, é concedido aos equipamentos que apresentem os melhores índices de eficiência energética e que cumprem requisitos ambientais. É concedido preferencialmente aos equipamentos integrantes do

Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE. O Selo Procel também pode ser concedido a equipamentos que não são abrangidos pelo PBE, com a condição de que seja feito um acordo prévio entre o Procel e as entidades de classe (ELETROBRAS, 2013).

**Figura 4 - Etiqueta PBE e Selo PROCEL**



Fonte: (www.ambienteenergia.com.br)

### 3.3 Metodologia do Cálculo de Eficiência Energética de Refrigeradores utilizada pelo PBE

Segundo Salvador (2013), são definidos dois ensaios específicos de refrigeradores domésticos para fins de etiquetagem, regulamentados pelo PBE: o ensaio de classificação térmica e o ensaio de consumo energético.

No ensaio de classificação térmica, o aparelho sob teste é submetido a um ambiente de temperatura controlada de 43°C, onde são medidas e verificadas as temperaturas internas declaradas. Por exemplo, na existência de compartimento de baixa temperatura (congelador) o mesmo é preenchido com carga térmica com propriedades equivalentes a carne magra. Nesta condição, as temperaturas devem obedecer aos limites estabelecidos. Caso seja classificado como três estrelas, o resultado que se busca é a de temperatura menor de -18°C (dezoito graus negativos). No ensaio de consumo de eletricidade, a temperatura ambiente de teste é reduzida de 43°C para 32°C, onde o consumo de energia elétrica do produto é tomado em ciclos de medidas durante 72 horas ininterruptas. Nesses ensaios as portas dos refrigeradores são mantidas fechadas (SALVADOR, 2013, p.15).

Conforme estabelecido pelo Inmetro (2005), as normas aplicáveis a Refrigeradores e Assemelhados para permissão do uso da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) são as listadas a seguir:

- ISO 7371 - Household refrigerating appliances - Refrigerators with or without low-temperature compartment - Characteristics and tests methods (Refrigeradores de 01 porta, compactos e "All refrigerator");
- ISO 8187 - Household refrigerating appliances - Refrigerator-freezers - Characteristics and tests methods (Combinados);
- ISO 5155 - Household refrigerating appliances - Frozen food storage cabinets and food freezers - Characteristics and tests methods (Congeladores e Conservadores de alimentos congelados verticais e horizontais);
- ISO 8561 - Household refrigerating appliances - Refrigerators, refrigerators-freezers, frozen food storage cabinets and food freezers cooled by internal forced air circulation - Characteristics and tests methods (Refrigeradores, combinados, congeladores e conservadores frost-free (no frost)).

Os refrigeradores são divididos em categorias, conforme mostrado na Tabela 1, que representam um agrupamento de produtos comparáveis, que dependem tanto da abrangência da norma aplicável quanto das características físicas do modelo (INMETRO, 2005).

**Tabela 1 - Categorias para análise de eficiência energética congeladores e refrigeradores**

Categoria	Nomenclatura	Abrangência
1	Refrigerador	All refrigerator, refrigerador de uma e duas estrelas (Produtos abrangidos pela norma ISO 7371)
2	Combinado	Produtos abrangidos pelas normas ISO 8187
3	Combinado Frost-free	Produtos abrangidos pelas normas ISO 8561
4	Congelador vertical	Produtos abrangidos pelas normas ISO 5155
5	Congelador vertical Frost-free	Produtos abrangidos pelas normas ISO 85616
6	Congelador horizontal	Produtos abrangidos pelas normas ISO 5155

**Fonte: INMETRO, 2005**

Para fins de avaliação de eficiência energética, o Regulamento específico para uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – linha de refrigeradores e assemelhados utiliza o Índice de Eficiência Energética (INMETRO, 2005).

O Índice de Eficiência Energética (IE) é um índice definido pela razão entre o consumo declarado (C) e o consumo padrão (C<sub>p</sub>) e é representado pela equação abaixo:

$$IE = \frac{C}{C_p} \quad (10)$$

O consumo declarado é obtido mediante ensaios em laboratório e o consumo padrão é definido como o consumo de energia equivalente ao volume ajustado. O consumo padrão é calculado pela Equação 11:

$$C_p = a \times AV + b \quad (11)$$

Onde:

C<sub>p</sub> = consumo padrão

AV = volume ajustado.

Os valores de a e b que determinam a equação da reta de consumo padrão de cada categoria estão representados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Retas de consumo padrão das categorias**

Categoria	a	b
Refrigerador	0,0346	19,117
Combinado	0,0916	17,083
Combinado frost free	0,1059	7,4862
Congelador vertical	0,0211	39,228
Congelador vertical frost free	0,0178	58,712
Congelador horizontal	0,0758	13,095

Fonte: INMETRO, 2005

É importante ressaltar que o consumo padrão de equipamentos é determinado com base no consumo dos equipamentos em um determinado ano, dentro de cada categoria de equipamento (como por exemplo, vertical, frost free). Desta maneira o  $C_p$  médio é igual ao consumo declarado neste ano, sendo o IE igual a 1.

O cálculo do volume ajustado (AV) de refrigeradores e congeladores é efetuado considerando o volume interno do equipamento em relação às temperaturas nominais de classificação de cada compartimento e seção, conforme descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Temperatura nominal de classificação**

Temperatura mais elevada obtida no compartimento congelador ou em sua seção ( $T_c$ )	Temperatura nominal de classificação ( $^{\circ}\text{C}$ )	Número de estrelas
$T_c > -6^{\circ}\text{C}$	0	0
$-12^{\circ}\text{C} < T_c \leq -6^{\circ}\text{C}$	-6	1 (*)
$-18^{\circ}\text{C} < T_c \leq -12^{\circ}\text{C}$	-12	2 (**)
$T_c \leq -18^{\circ}\text{C}$	-18	3 (***)

Fonte: INMETRO, 2005

O volume ajustado é caracterizado pela expressão abaixo:

$$AV = V_r + \sum f \cdot V_c \quad (12)$$

Onde:

$V_r$  = volume do compartimento refrigerador (em litros)

$V_c$  = volume do compartimento congelador ou de sua seção segundo temperatura de classificação (em litros)

$f$  = valor equivalente a classificação de cada compartimento e definido conforme Tabela 4

Para modelos frost-free,  $V_r$  e  $V_c$  são multiplicados por 1,2.

O fator  $f$  pode ser encontrado na Tabela 4:

**Tabela 4 - Fator correspondente à classificação em estrelas do compartimento congelador**

Compartimento	F
1 estrela	1,41
2 estrelas	1,63
3 estrelas	1,85

**Fonte: INMETRO, 2005**

Segundo Salvador (2013), o fator  $f$  foi determinado considerando as temperaturas nominais dos compartimentos internos do refrigerador em relação à temperatura equivalente ambiental, que foi arbitrada como 32 °C para o Brasil. O fator  $f$  pode ser calculado a partir da Equação 13:

$$f = \frac{(32 - T_c)}{(32 - T_r)} \quad (13)$$

Onde:

$T_c$  = Temperatura nominal de classificação (Tabela 3.2)

$T_r$  = Temperatura nominal do refrigerador, estabelecido como 5°C

Após o cálculo do Índice de Eficiência Energética (IE), os refrigeradores são classificados em classes de eficiência, que atualmente variam da letra A (mais eficientes) até a E (menos eficientes). Atualmente são utilizados dois agentes de expansão de espumas: o R141b e o Ciclopentano. As Tabelas 5 e 6 mostram os Índices de Eficiência Energética mínimos para cada classe conforme o agente de expansão de espuma do equipamento:

Tabela 5 - Índices mínimos para agente de expansão de espumas R141b

Classes	Refrigerador	Combinado	Combinado frost-free	Congelador vertical	Congelador vertical frost-free	Congelador horizontal
<b>A</b>	<b>0,820</b>	<b>0,820</b>	<b>0,812</b>	<b>0,820</b>	<b>0,820</b>	<b>0,820</b>
<b>B</b>	<b>0,893</b>	<b>0,893</b>	<b>0,884</b>	<b>0,893</b>	<b>0,893</b>	<b>0,893</b>
<b>C</b>	<b>0,972</b>	<b>0,972</b>	<b>0,963</b>	<b>0,972</b>	<b>0,972</b>	<b>0,972</b>
<b>D</b>	<b>1,059</b>	<b>1,059</b>	<b>1,049</b>	<b>1,059</b>	<b>1,059</b>	<b>1,059</b>
<b>E</b>	<b>&gt; 1,059</b>	<b>&gt; 1,059</b>	<b>&gt; 1,049</b>	<b>&gt; 1,059</b>	<b>&gt; 1,059</b>	<b>&gt; 1,059</b>

Fonte: INMETRO, 2005

Tabela 6 - Índices mínimos para agente de expansão de espumas Ciclopentano

Classes	Refrigerador	Combinado	Combinado frost-free	Congelador vertical	Congelador vertical frost-free	Congelador horizontal
<b>A</b>	<b>0,855</b>	<b>0,855</b>	<b>0,846</b>	<b>0,855</b>	<b>0,855</b>	<b>0,855</b>
<b>B</b>	<b>0,931</b>	<b>0,931</b>	<b>0,921</b>	<b>0,931</b>	<b>0,931</b>	<b>0,931</b>
<b>C</b>	<b>1,014</b>	<b>1,014</b>	<b>1,003</b>	<b>1,014</b>	<b>1,014</b>	<b>1,014</b>
<b>D</b>	<b>1,104</b>	<b>1,104</b>	<b>1,092</b>	<b>1,104</b>	<b>1,104</b>	<b>1,104</b>
<b>E</b>	<b>&gt; 1,104</b>	<b>&gt; 1,104</b>	<b>&gt; 1,092</b>	<b>&gt; 1,104</b>	<b>&gt; 1,104</b>	<b>&gt; 1,104</b>

Fonte: INMETRO, 2005

### 3.4 Estudos sobre o Desempenho Energético de Refrigeradores

Conforme observado por Westphalen (2002), a melhora substancial ocorrida nos refrigeradores domésticos nos Estados Unidos durante os últimos vinte anos devido à implementação do National Appliance Energy Conservation Act, assim como a economia de energia resultante, indicam um potencial para melhoria no setor comercial.

Westphalen (2002) aplicou técnicas usadas extensivamente em modelos de refrigeradores domésticos para reduzir o consumo energético em um refrigerador comercial. O refrigerador comercial foi submetido a testes de medida de consumo energético, como o NFS 7 Capacity Test e o Energy Test (AHSRAE 117). Foi utilizada uma gama de modificações de projeto para melhoramento do sistema de refrigeração e da cabine, de modo a chegar a uma configuração com melhor custo-benefício. Entre estas modificações estão uma

melhor vedação nas portas e o uso de um sistema otimizado de refrigeração utilizando o R-404A como fluido refrigerante.

O National Sanitation Foundation (NSF) 7 Capacity Test é um teste realizado a 100 °F (37.8 °C) para refrigeradores comerciais para verificar a capacidade adequada. O teste é realizado com o refrigerador vazio e com as portas fechadas. Para obter a certificação da NFS o ciclo de trabalho máximo do compressor durante o teste deve ser 70%, mantendo as temperaturas internas a 40 °F (4.4 °C ou menor), em um período de 24 horas (ANSI/NSF 7, 1999 apud WESTPHALEN, 2002).

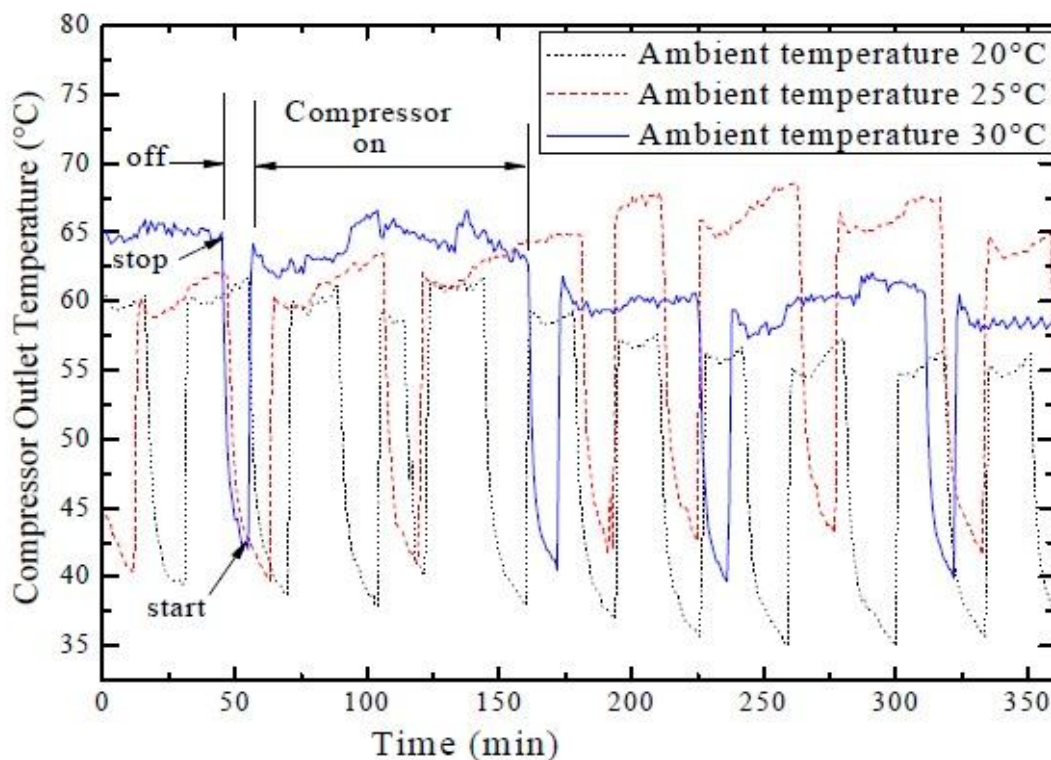
O Energy Test (ASHRAE 117) é um teste que tem sido adotado por Canadá, California e EPA Energy Star para refrigeradores comerciais. É um teste complexo com abertura de porta, umidade ambiente controlada e pacotes de teste com água e sal. As condições ambientais previstas são uma temperatura ambiente de 75 °F (23,9 °C) e umidade relativa de 55% para um ambiente típico em cozinhas comerciais (ANSI/ASHRAE 117, 1992 apud WESTPHALEN, 2002).

No âmbito de refrigeradores domésticos, Khan et al. (2013) publicou alguns resultados interessantes de pesquisas investigativas que concernem aos efeitos de variáveis operacionais no consumo energético de um refrigerador doméstico. Foram observados os efeitos do número de abertura de porta durante um intervalo de tempo, assim como o tempo de permanência de porta aberta a cada abertura. As influências das variações de temperatura e carga térmica também foram analisadas. Os resultados de seus estudos indicam que o número de aberturas de porta, a duração da porta na posição aberta, a temperatura ambiente e a carga térmica têm forte influência no consumo de um refrigerador, de modo que todos esses parâmetros são diretamente proporcionais ao consumo.

O aumento da temperatura ambiente aumenta a diferença de temperatura entre o gabinete e o ambiente, então haverá um aumento de transferência de calor convectiva e radiativa durante a abertura de porta e condutiva através das paredes. Para manter a temperatura desejada, a duração do tempo de atividade do compressor aumenta (KHAN et al., 2013). No Gráfico 2 podemos verificar este comportamento.



Gráfico 2 - Temperatura de saída do compressor versus Temperatura ambiente



Fonte: KHAN et al, 2013

Geppert (2011) investigou o impacto de várias condições de uso de refrigeradores domésticos na Europa, sob uma perspectiva que leva em consideração as condições reais de uso destes aparelhos. Através de ensaios realizados em laboratório com condições ambientes controladas, seus estudos revelaram que a temperatura ambiente tem a maior influência no consumo energético de um refrigerador. Outro resultado significativo foi que a carga de um refrigerador não tem quase nenhum impacto no consumo energético, em ensaios realizados com condições externas controladas.

A influência da temperatura ambiente no consumo energético de refrigeradores é destacada no modelo conceitual de avaliação do Selo Procel proposto por Cardoso (2008), que sinaliza o problema dos ensaios padronizados pelo PBE utilizarem uma temperatura fixa (32 °C), como especificada pela norma ISO 7371:1995. Cardoso (2008) destaca a diversidade climática existente nas regiões brasileiras, que faz com que a temperatura utilizada nos ensaios do PBE não seja representativa para todas as regiões. Para representar um consumo de maneira mais realista, ele inclui em seu modelo o efeito das temperaturas médias anuais de cada região do país no consumo dos equipamentos.

Cardoso; Haddad e Nogueira (2009) consideram o efeito das temperaturas médias anuais de cada região para ajustar o consumo dos ensaios de refrigeradores realizados em câmaras fechadas com temperatura de ensaio a 32 °C. Esse consumo ajustado é uma das bases para o estudo destes autores sobre a viabilidade econômica para a aquisição de refrigeradores eficientes no Brasil etiquetados com o Selo Procel.

Embora não façam parte da avaliação compulsória de desempenho de refrigeradores realizada pelo Inmetro, os ensaios de abaixamento de temperatura (*pull-down*) são importantes para avaliar a performance de refrigeradores. Segundo Zimmermann et al.(2002), nos ensaios de *pull-down* são monitoradas as temperaturas internas do refrigerador ensaiado e as grandezas elétricas, como corrente, tensão e potência, do momento em que o sistema parte até o tempo em que é atingido o regime permanente. Um dos objetivos é determinar o tempo necessário para que a temperatura média do ar no interior do gabinete atinja uma temperatura de referência, que é pré-estabelecida conforme a norma. Além disso, Seidel (2001) atribui a necessidade destes testes à avaliação de efeitos de partida e também do comportamento transiente do sistema até que o refrigerador alcance a condição de regime permanente.

Os ensaios de *pull-down* variam conforme a norma adotada. Para a realização dos ensaios de *pull-down*, a norma NTB 00048 estabelece uma temperatura ambiente de 43°C para sistemas de refrigeração de classe “T” (clima tropical) e de 32°C para climas temperados, que é representado pela classe “N”. Esta norma ainda estipula que todos os dispositivos que interrompam o funcionamento contínuo do compressor (como termostatos, temporizadores de degelo, fabricante de gelo, entre outros) sejam desligados. Antes do teste a temperatura de todo o sistema deve ser equalizada. Com a porta do gabinete fechada, o refrigerador é ligado e o ensaio dura até que o sistema alcance o regime permanente em funcionamento contínuo, com variações de temperatura inferiores a 0,5°C durante um período de 3 horas. Esta condição é geralmente alcançada após um período de 24 horas. Nesta norma, define-se o tempo de *pull-down* como o tempo necessário para que o sistema atinja uma temperatura interna média de 5°C para refrigeradores da classe “N” e de 7°C para refrigeradores da classe “T” (NTB 00048 apud SEIDEL, 2001).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

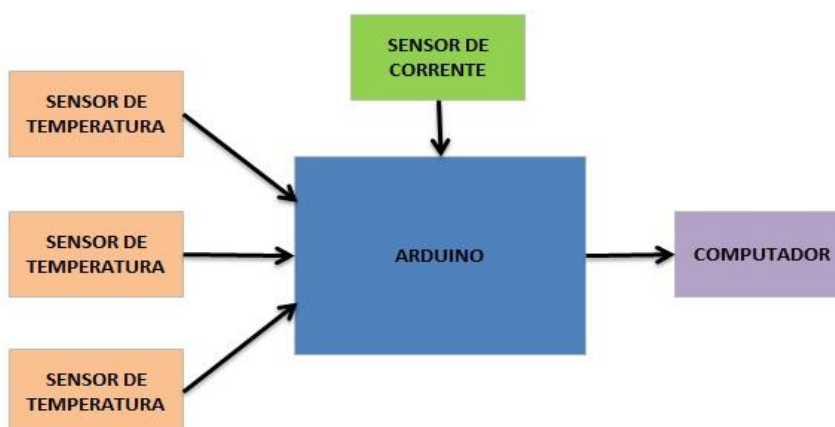
Neste capítulo são apresentados o aparato experimental construído pelo autor para realizar a aquisição dos dados; os procedimentos experimentais utilizados e a metodologia utilizada para corrigir o consumo quando o refrigerador é utilizado em uma temperatura diferente da ensaiada.

### 4.1 Construção do Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados foi idealizado para ser de baixo custo, eficiente, de fácil utilização e passível de ser incrementado posteriormente.

Ele é constituído basicamente por três sensores de temperatura, um sensor de corrente e um microcontrolador Arduino, além de um computador, para a programação e aquisição de dados. A figura 5 tem uma representação esquemática do modelo idealizado:

**Figura 5 - Representação esquemática do sistema de aquisição de dados**



**Fonte: Elaborado pelo próprio autor.**

O microcontrolador Arduino é utilizado para ler as entradas, realizar o processamento necessário e fornecer alguns valores de interesse, como por exemplo, corrente e temperatura. Neste projeto foi utilizado o Arduino Uno (Figura 6), que é uma placa microcontroladora baseada no ATmega328P. Esta placa possui 14 pinos de entradas/saídas digitais, 6 entradas

analógicas, um oscilador de cristal de 16 MHz, uma porta USB, um botão de reset, além de uma fonte de alimentação externa. No projeto, o Arduino é alimentado pela porta USB.

**Figura 6 - Arduino UNO**



Fonte: (<http://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>)

No circuito referente à medida de energia foi utilizada a biblioteca do OpenEnergyMonitor (2016), um projeto de código livre destinado à criação de ferramentas de monitoramento de energia. A corrente foi medida com um sensor de corrente não invasivo, de modo que não precise conectar o sensor em série com o circuito. No entanto, não foi utilizado um mecanismo para medir a tensão de forma contínua, em virtude de este ser um protótipo preliminar, idealizado para ter o menor custo possível. Para o cálculo da potência, a tensão na rede foi considerada como uma constante inserida no programa. Esta constante foi determinada com algumas leituras pontuais de voltagem ao longo dos ensaios. O sensor de corrente utilizado foi o SCT-013-020, ilustrado na Figura 7, que mede corrente com valores de até 20 A. A linearidade deste sensor é  $\pm 3\%$ .

**Figura 7 - Sensor de corrente SCT-013-020**



Fonte: (<http://www.filipeflop.com>)

Foram utilizados três sensores de temperaturas DS18B20 (Figura 8), que são responsáveis por medir as temperaturas nos pontos de interesse. Estes sensores digitais de temperatura são à prova d'água e conseguem realizar medidas de temperaturas que variam de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que a incerteza de medição no intervalo de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  é de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A resolução dos sensores pode ser ajustada via programação para  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Foi escolhida a resolução de  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  porque esta resolução já atende o propósito do trabalho.

**Figura 8 - Sensor de temperatura DS18B20**



Fonte: (<http://www.filipeflop.com>)

A programação referente a este protótipo se encontra no apêndice 1.

## **4.2 Procedimentos Experimentais**

Os ensaios foram realizados em uma geladeira Electrolux Degelo Prático RE28, exibida na Figura 9. As principais especificações técnicas do equipamento são:

- Capacidade de armazenagem total (l): 240;
- Capacidade de armazenagem do refrigerador (l): 214;
- Capacidade de armazenagem do congelador (l): 26;
- Tensão/Voltagem: 110 V, 220 V;
- Consumo de energia: 23,7 kWh/mês;
- Classificação de consumo (selo Procel): A;

- Pressão de alta - baixa (kPa): 1514/121;
- Agente de expansão das espumas:  $C_5H_{10}$  (Ciclopentano);

**Figura 9 - Refrigerador Electrolux Degelo Prático RE28**



**Fonte: (<http://www.filipeflop.com>)**

O refrigerador foi instrumentado com um sistema de aquisição de dados elaborado pelo autor, que foi descrito na seção 4.1. Os tipos de ensaios realizados foram os seguintes: ensaio para estimar o consumo mínimo durante um período de 24 horas; ensaio para estudar a influência da abertura periódica de porta no consumo de um refrigerador e ensaio de porta aberta.

O ensaio principal tem a finalidade de determinar a energia mínima necessária para manter o refrigerador funcionando em um período de 24 horas dado uma temperatura ambiente média. O ensaio foi conduzido em uma sala comum, onde as condições ambientes não são controladas, logo existem variações de temperatura ao longo do ensaio. A posição do termostato foi mínima durante o ensaio, já que o objetivo aqui é mensurar o mínimo consumo energético. Além disso, o ensaio foi realizado com portas fechadas e o refrigerador vazio. Antes do ensaio começar, a geladeira passou por um período de acomodação, onde as portas do refrigerador e do compartimento congelador ficaram abertas para que as temperaturas dos compartimentos internos da geladeira se igualassem com a temperatura ambiente. O ensaio começou no momento em que o refrigerador foi ligado. Logo, o consumo referente ao abaixamento de temperatura (*pull-down*) também foi incluído na análise de 24 horas e consequentemente no consumo diário total.

O emprego do termo *pull-down* é utilizado neste trabalho para designar o abaixamento de temperatura correspondente ao período de tempo necessário para atingir uma temperatura

referente à média das temperaturas máxima e mínima do compartimento congelador do refrigerador quando a temperatura deste compartimento se encontra em uma faixa estável de oscilações de temperatura. Cabe ressaltar que a temperatura do refrigerador oscila devido à atuação do termostato, que faz com que o refrigerador opere em um regime cíclico.

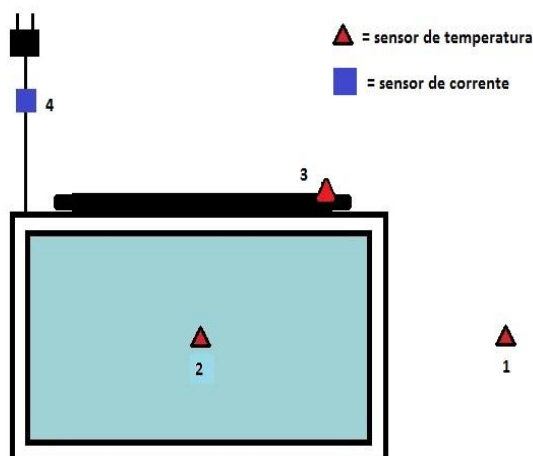
Foram realizados alguns ensaios de 24 horas para que seja possível validar o método proposto pelo autor que tem como objetivo a correção do consumo dado uma variação de temperatura.

Neste ensaio de consumo mínimo são utilizados três sensores idênticos de temperatura, que foram descritos anteriormente na seção 4.1. Um desses sensores de temperatura é utilizado para medir a temperatura ambiente e é posicionado próximo ao refrigerador (distância aproximada de 50 cm); um segundo sensor é colocado no centro geométrico do congelador e o terceiro é colocado próximo ao condensador.

Além disso, um sensor de corrente não invasivo é utilizado para medir a corrente ao longo das 24h, que multiplicado pela tensão inserida no programa fornece a potência aparente.

A Figura 10 ilustra a posição dos sensores:

**Figura 10 – Esquema da disposição dos sensores (vista superior)**



**Fonte: Elaborado pelo próprio autor.**

Na figura 10, temos:

1. Sensor de temperatura para medir temperatura ambiente; localizado a 50 cm do refrigerador.
2. Sensor de temperatura para medir a temperatura no centro do compartimento congelador;
3. Sensor de temperatura para medir a temperatura próxima ao condensador;

4. Sensor de corrente não invasivo para medir a corrente durante o ensaio.

O ensaio para verificar a influência da abertura periódica de porta no consumo foi realizado de forma que a porta da geladeira era aberta a  $90^\circ$  e permanecia aberta em um intervalo de vinte segundos. O teste começou com a geladeira em funcionamento, de modo que a temperatura interna do congelador já se encontrava dentro de uma faixa de oscilação estável. A frequência de abertura escolhida foi de trinta minutos e cinco aberturas foram realizadas em duas horas e vinte minutos de ensaio. A primeira abertura foi realizada dez minutos depois de o ensaio começar e a última abertura dez minutos antes de o ensaio terminar. A abertura de porta era feita de modo manual e o tempo decorrido da abertura era medido a partir de um cronômetro. A posição do termostato, assim como o ensaio do consumo mínimo diário, também foi mínima. Este ensaio foi realizado para verificar quão significativa a influência da abertura de porta é para o consumo energético se o refrigerador estiver vazio.

O terceiro ensaio tem o objetivo de verificar o comportamento do equipamento em um regime extremamente forçado, de forma que a porta do refrigerador se mantém aberta o tempo inteiro a  $90^\circ$ . Todavia a porta do congelador se manteve fechada. O refrigerador foi submetido a esta condição por uma hora. Da mesma forma que o teste de abertura periódica de porta, este teste foi iniciado com a geladeira em funcionamento, com a temperatura interna do congelador oscilando dentro de uma faixa estável e com o termostato na posição mínima.

### **4.3 Metodologia Proposta para a Correção da Variação de Temperatura Ambiente**

Com base nos dados obtidos a partir dos ensaios e conforme observado por Khan et al. (2013), pode-se afirmar que o consumo está diretamente relacionado ao período em que o compressor está ligado em relação ao período de tempo observado. Isto se deve ao fato do compressor operar com potência aproximadamente constante durante seu regime de funcionamento. Obtendo a potência média e sabendo o período de funcionamento do compressor, podemos fazer uma estimativa de seu consumo.

Uma solução para comparar consumos de energia de ensaios realizados em ambientes cuja temperatura não é controlada é obter a temperatura média de cada ensaio e usar um fator de correção para correlacionar a variação da temperatura e o parâmetro de interesse, ou seja, o



consumo. A solução proposta neste trabalho se aproveita do que foi dito com respeito ao período de atividade do compressor e cria um fator que correlaciona temperatura ambiente e período de atividade do compressor. Esse fator servirá para ajustar o consumo total quando há uma variação de temperatura ambiente.

Para a obtenção desse fator, denominado  $\kappa$ , é necessário realizar os procedimentos abaixo:

- a) Obter o percentual do funcionamento do compressor em um dado intervalo de tempo para um período onde a temperatura se manteve estável.
- b) Obter o percentual do funcionamento do compressor em um intervalo de tempo igual ao do primeiro passo, só que para uma temperatura estável diferente.
- c) Observando a relação de proporcionalidade de temperatura ambiente e período de atividade do compressor, podemos dividir o valor obtido do percentual da maior temperatura pelo valor obtido do percentual da menor temperatura, o que resulta em uma constante ( $\kappa$ ).

Cabe ressaltar que os intervalos de tempo analisados devem pertencer ao período em que a geladeira já se encontra estabilizada, ou seja, deve-se descartar quaisquer intervalos que se encontram no período *pull-down*. Os intervalos de tempo considerados também devem ser grandes o suficiente para que sejam capazes de representar a atividade do compressor de maneira legítima. Pela experiência obtida através dos ensaios, são indicados intervalos de tempo de pelo menos 30 minutos.

Para maiores temperaturas, é sabido que o período de atividade do compressor é maior. Se conhecermos o consumo  $C_1$  de um refrigerador quando ele opera em uma temperatura ambiente  $T_1$  conhecida, podemos prever o consumo  $C_2$  deste mesmo equipamento operando a uma temperatura  $T_2$  diferente, usando o fator  $\kappa$ , através da seguinte relação:

$$C_{\text{prev.}} = \kappa \times \Delta T + C_1 = \kappa \times (T_{\text{prev.}} - T_1) + C_1 \quad (14)$$

Onde:

$C_{\text{prev.}}$  = consumo previsto ;

$T_{\text{prev.}}$  = temperatura ambiente média prevista para o dia o qual o consumo é desejado;

$T_1$  = temperatura ambiente média referente ao ensaio cujo consumo é conhecido ;

$C_1$  = consumo conhecido através de um ensaio;

$\kappa$  = fator de correção ( $\frac{\text{kWh}}{^{\circ}\text{C}}$ ).

Por meio deste fator, podemos estimar também um consumo médio anual próximo da realidade, sabendo o consumo de um refrigerador para uma determinada temperatura (com base em ensaios) e aproveitar esse fator  $\kappa$  para corrigir o consumo médio ao longo do ano, considerando as variações de temperatura decorrentes de cada estação, além das variações relativas a cada região.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo deste capítulo serão expostos os resultados obtidos para cada um dos ensaios propostos no capítulo anterior, que são os seguintes: ensaio para estimativa do consumo mínimo diário do refrigerador; ensaio para determinar a influência da abertura de porta no consumo do refrigerador e ensaio para verificar o consumo em uma condição extrema (com a porta da geladeira aberta a 90°C).

A proposta da metodologia para corrigir o consumo em função da variação de temperatura ambiente, que é um dos objetivos do trabalho, é testada e validada neste capítulo.

### 5.1 Ensaio de Consumo Mínimo Diário

Este ensaio tem como objetivo oferecer uma alternativa a metodologia adotada pelo Inmetro para analisar o consumo energético, mas não substituí-la.

Como existem cargas indutivas no refrigerador, é necessário multiplicar a potência aparente, que é medida instantaneamente com o sensor de corrente, por um fator de potência, para que se possa obter o valor da potência ativa. Para o cálculo do fator de potência, foi medida a potência ativa por um intervalo de tempo com um Wattímetro (Figura 11).

A potência ativa foi determinada como a média aritmética ponderada das leituras neste intervalo, cujo valor resultante foi 105 W. Este valor foi dividido pelo valor médio da potência aparente quando o compressor estava em funcionamento, cujo valor resultou em aproximadamente 168 VA. O fator de potência foi calculado pela Equação 9:

$$FP = \frac{\text{Potência ativa}}{\text{Potência aparente}} = \frac{105}{168} = 0,625$$

**Figura 11 - Medição da potência ativa**

**Fonte: Elaborado pelo próprio autor**

Para estimar um consumo mínimo para o refrigerador em um intervalo de 24 horas foram realizados alguns ensaios. Foram adquiridos dados a cada segundo do ensaio. O consumo diário, quantificado em kWh, foi obtido a partir de uma potência instantânea média multiplicada pelo período de funcionamento do equipamento, isto é, 24 horas.

Além disso, a parcela do consumo referente às partidas do compressor também foi calculada para investigar o quão representativo ela é no valor total de energia consumida. Ela é denominada Potência total dos picos na Tabela 7, pois nesses transientes de partida temos os maiores valores de corrente, e consequentemente, potência maiores.

Os valores que representam o tempo de atividade e ociosidade do compressor também foram calculados, sendo extremamente importantes para a utilização da metodologia proposta para a correção do consumo em função da variação de temperatura ambiente.

Em virtude dos ensaios serem realizados na mesma época do ano, não houve uma grande variação nos valores de temperatura ambiente entre eles, de maneira que foram usados os dois ensaios com as maiores variações de temperaturas ambientes entre si para análise.

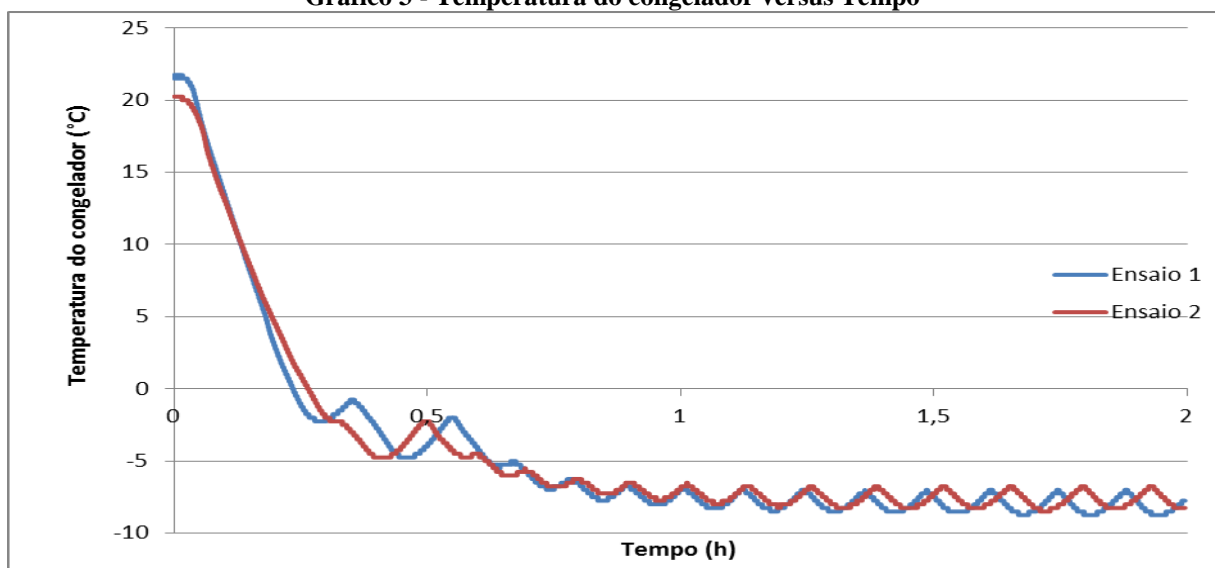
Os dados obtidos a partir desses ensaios estão representados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Comparação do consumo entre os dois ensaios**

Ensaio de consumo mínimo diário		
Ensaio	1	2
Fator de potência	0,625	0,625
Potência total dos picos [kW]	102,421	103,108
Potência total [kW]	1877,927	1695,091
Potência total dos picos/Potência total [%]	5,454	6,083
Temperatura ambiente média do ensaio [°C]	22,43	21,08
Tempo do compressor desligado [h]	16,928	17,656
Tempo do compressor ligado [h]	7,072	6,344
Tempo do compressor ligado [%]	29,468	26,433
Potência média necessária [kW]	0,022	0,020
Energia mínima média diária [kWh]	0,522	0,471
Energia mínima média mensal [kWh]	15,649	14,126

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O Gráfico 3 mostra a variação de temperatura no congelador em função do tempo e com base nele podemos verificar o *pull-down*, ou seja, o tempo em que o compartimento do congelador abaixa da temperatura ambiente até uma faixa cíclica estável da temperatura interna do congelador. A temperatura de referência, que marca o fim dos ensaios de *pull-down* nas normas, é representada aqui pela temperatura média entre a temperatura máxima e mínima quando a temperatura do compartimento congelador entra na faixa cíclica estável.

**Gráfico 3 - Temperatura do congelador versus Tempo**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Podemos verificar também pelo Gráfico 3 que o tempo de *pull-down* dos ensaios são bastante próximos porque os valores de temperatura ambiente no início dos ensaios considerados também são próximos.

O tempo de *pull-down* é um valor significativo, pois sabendo o tempo de estabilização, podemos calcular o consumo neste período e verificar se vale a pena ou não desligar o refrigerador em períodos em que não estamos utilizando este equipamento.

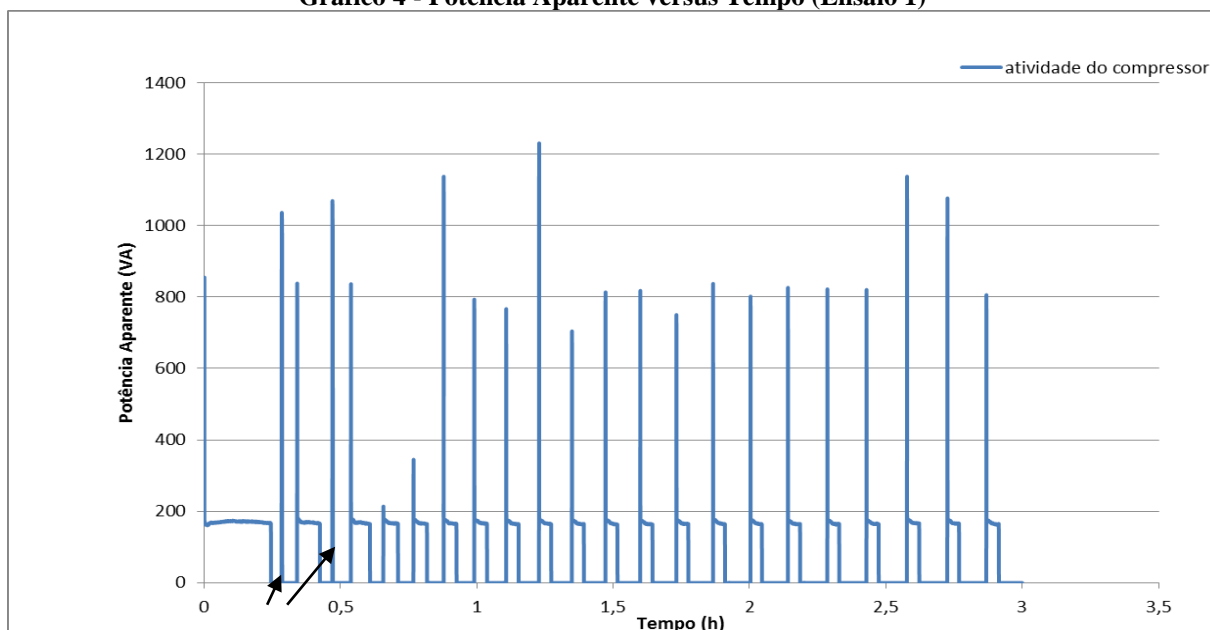
Na Tabela 8, que traz uma análise do período de abaixamento de temperatura, nota-se que uma parcela significativa do valor energético é consumida durante o *pull-down*. Isso se deve ao fato do compressor estar em atividade em grande parte do tempo neste período. O tempo de *pull-down*, assim como a energia consumida, serão maiores quanto maior for a temperatura ambiente e menor for a temperatura interna configurada no termostato.

**Tabela 8 - Comparativa do *Pull-down* entre os dois ensaios**

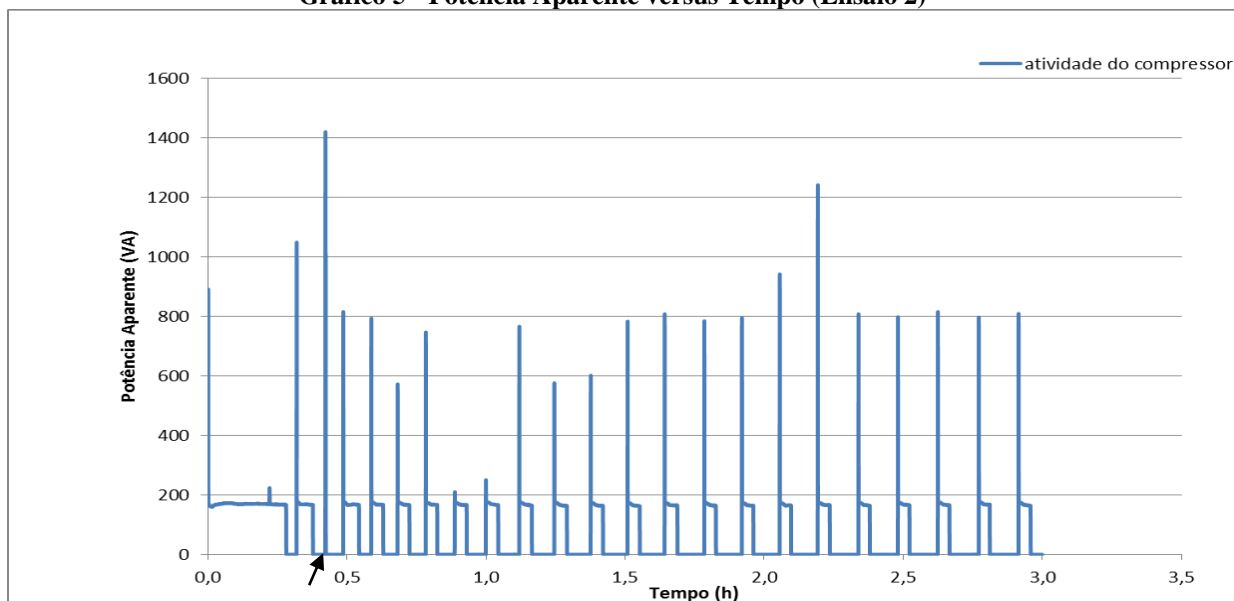
<i>Pull-down</i>		
Ensaio	1	2
Temperatura máxima [°C]	-7	-7
Temperatura mínima [°C]	-9	-8,5
Temperatura de referência [°C]	-8	-7,75
Potência pull-down [kW]	148,595	150,281
Potência total do ensaio [kW]	1877,927	1695,091
Potência pull-down/Potência total do ensaio [%]	7,91	8,87

**Fonte: Elaborado pelo próprio autor**

Para uma simples comparação de valores, considerando o valor de energia dispendido ao longo das 24 horas do Ensaio 1, que é igual a 0,522 kWh, se considerarmos que o *pull-down* consome aproximadamente 7,91% da energia, podemos dizer que quase 0,0413 kWh foram gastos neste período. Durante o período de meia-noite às seis da manhã deste ensaio foram gastos cerca de 0,12 kWh. Se o consumo deste período noturno for repartido igualmente pelo número de horas obtemos o consumo horário noturno, que é 0,02 kWh, valor próximo à metade do consumo referente ao *pull-down*. Então é razoável desligar esta geladeira sempre que ela não estiver em uso, principalmente por longos períodos de tempo (neste caso específico, um tempo maior que 2 horas).

**Gráfico 4 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio 1)**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Gráfico 5 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio 2)**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Através do entendimento do circuito elétrico da geladeira, é possível entender os picos no momento de partida do compressor, observados no Gráfico 4 e no Gráfico 5. Uma breve explicação sobre o fenômeno é exposta a seguir:

O funcionamento do circuito elétrico do refrigerador se dá da seguinte forma: quando os terminais do termostato se fecham, circulará uma elevada corrente elétrica que atravessará o protetor térmico, o enrolamento “marcha” do compressor e a bobina do relé, fechando o circuito. A corrente que atravessa esta bobina cria um campo magnético que fecha os contatos do interruptor do relé, desviando a corrente elétrica para o enrolamento auxiliar do compressor. Esta ação do relé dura poucos segundos, servindo apenas para auxiliar a partida do motor. Com o motor na rotação correta (marcha), a corrente que circulará será muito menor que a consumida durante a partida, impossibilitando o acionamento do relé. O compressor será desligado assim que a chave do termostato for aberta, o que dependerá da temperatura interna do refrigerador (ALMEIDA, 2010, p.106,107).

Ainda, Seidel (2001) remete a presença destes picos de corrente e tensão à inércia dos componentes móveis do compressor e ao óleo lubrificante, que neste momento de partida ainda não se localiza nas regiões desejadas e não possui a viscosidade adequada.

Foi observado também tentativas do compressor dar a partida (indicados por setas no Gráfico 4 e no Gráfico 5), no começo dos ensaios. Isso pode ser explicado pelo fato do tubo capilar não obstruir o fluxo de refrigerante para o evaporador quando o sistema está desligado. Quando o compressor é desligado, as pressões do lado de alta e baixa pressão se igualam através do tubo capilar, além do líquido residual do condensador ir para o evaporador. Se este líquido residual estiver em grande quantidade, pelo fator de estar à temperatura de condensação, poderá trazer como consequências degelo do evaporador e/ou ciclagem curta do compressor (VENTURINI; PIRANI, 2005). Com base nisso, estas tentativas do compressor dar a partida podem ser interpretadas como um caso extremo de ciclagens curtas, tão pequenas que praticamente só há o pico de partida.

Já a diferença de magnitude dos picos está associada ao tempo de tomada de dados do Arduino, que foi configurado para tomar dados a cada 1 segundo. O transiente de partida acontece tão rápido de modo que nem sempre é possível o sensor registrar o maior valor.

## **5.2 Cálculo do Fator $\kappa$ com base nos Valores Experimentais**

Durante os ensaios realizados para o levantamento do consumo diário, informações relativas à temperatura ambiente e ao tempo de funcionamento do compressor foram registradas e calculadas, respectivamente. Ao longo desses ensaios também foi possível observar intervalos de tempos suficientemente grandes onde a temperatura se manteve estável, de modo que fosse possível o cálculo do fator  $\kappa$ .



Estes intervalos foram obtidos a partir de amostras prudentemente escolhidas, de forma que foram coletadas amostras quando o refrigerador já se encontrava estabilizado. As Tabelas 9, 10, 11 e 12 representam as amostras, separadas por ensaio e tempo de duração do período analisado.

**Tabela 9 - Análise do fator para tempo de 30 minutos (Ensaio 1)**

Análise para tempo de 30 minutos - Ensaio 1					
Temperatura	21,00	21,50	22,00	22,50	23,00
Tempo compressor desligado [h]	0,3609	0,3451	0,3434	0,3388	0,3239
Tempo compressor ligado [h]	0,1391	0,1549	0,1566	0,1612	0,1761
tempo Ligado/Tempo total (%)	27,8296	30,9891	31,3217	32,2363	35,2295
Constante $\kappa$ (kWh/°0,5C)		1,1135	1,0107	1,0292	1,0929
Constante $\kappa$ (kWh/°C) média			1,1232		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Tabela 10 - Análise do fator para tempo de 40 minutos (Ensaio 1)**

Análise para tempo de 40 minutos - Ensaio 1				
Temperatura	21,00	21,50	22,00	22,50
Tempo compressor desligado [h]	0,4822	0,4623	0,4590	0,4511
Tempo compressor ligado [h]	0,1844	0,2044	0,2077	0,2156
tempo Ligado/Tempo total (%)	27,6636	30,6569	31,1557	32,3405
Constante $\kappa$ (kWh/°0,5C)		1,1082	1,0163	1,0380
Constante $\kappa$ (kWh/°C) média			1,1083	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Tabela 11 - Análise do fator para tempo de 30 minutos (Ensaio 2)**

Análise para intervalos de 30 minutos - Ensaio 2						
Temperatura [°C]	19,50	20,00	20,50	21,00	21,50	22,00
Tempo compressor desligado [h]	0,3827	0,3811	0,3707	0,3620	0,3524	0,3396
Tempo compressor ligado [h]	0,1173	0,1189	0,1293	0,1380	0,1476	0,1604
tempo Ligado/Tempo total (%)	23,4550	23,7871	25,8626	27,6061	29,5155	32,0892
Constante $\kappa$ (kWh/°0,5C)		1,0142	1,0873	1,0674	1,0692	1,0872
Constante $\kappa$ (kWh/°C) média				1,1301		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Tabela 12 - Análise do fator para tempo de 40 minutos (Ensaio 2)**

Análise para intervalos de 40 minutos - Ensaio 2						
Temperatura [°C]	19,50	20,00	20,50	21,00	21,50	22,50
Tempo compressor desligado [h]	0,5097	0,5081	0,4956	0,4886	0,4740	0,4682
Tempo compressor ligado [h]	0,1569	0,1586	0,1710	0,1781	0,1926	0,1984
tempo Ligado/Tempo total (%)	23,5384	23,7875	25,6555	26,7140	28,8932	29,7650
Constante $\kappa$ (kWh/°0,5C)		1,0106	1,0785	1,0413	1,0816	1,0302
Constante $\kappa$ (kWh/°C) média				1,1060		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A constante  $\kappa$  nas tabelas foi calculada para uma variação de 0,5 °C, depois foi feito uma média das constantes  $\kappa$  encontradas. Posteriormente, foi realizada uma extrapolação para obter a variação do consumo energético para a variação de 1°C.

O fator  $\kappa$  foi calculado como a média das quatro constantes  $\kappa$  médias das tabelas anteriores e resultou em  $\kappa = 1,117 \text{ kWh/}^\circ\text{C}$ .

De modo a testar a metodologia, compararemos os dois ensaios de consumo mínimo de energia.

No Ensaio 1 foi obtido o valor de 15,649 kWh mensais para uma temperatura ambiente média de 22,43 °C. No Ensaio 2 foi lido 14,126 kWh mensais para uma temperatura ambiente média de 21,08 °C.

Usando os valores de energia e de temperatura ambiente média do Ensaio 1, poderíamos prever o consumo do Ensaio 2, conhecendo a temperatura ambiente média no dia o qual o Ensaio 2 foi realizado.

A partir da teoria para o cálculo do fator  $\kappa$ , temos a Equação 14:

$$C_{\text{prev.}} = \kappa \times \Delta T + C_1 = \kappa \times (T_{\text{prev.}} - T_1) + C_1$$

Substituindo os valores para achar o consumo do dia o qual foi realizado o Ensaio 2, temos:

$$C_{2 \text{ prev.}} = 1,117 \times (21,08 - 22,43) + 15,649 = 14,141 \text{ kWh.}$$

Para validarmos o modelo, podemos comparar o valor teórico com o valor conseguido mediante o ensaio e calcular o erro.

O erro relativo percentual do ensaio é calculo com base na expressão abaixo:

$$\varepsilon = \left( \frac{|x_0 - x|}{x} \right) \times 100 \quad (15)$$

Onde:

$\varepsilon$  = erro relativo percentual

$x_0$  = valor calculado

$x$  = valor obtido através do ensaio.

Então temos:

$$\varepsilon = \left( \frac{|14,141 - 14,126|}{14,126} \right) \times 100 = 0,11\%$$

Como este valor apresenta um erro muito pequeno, podemos utilizar o modelo proposto para estimarmos o consumo de maneira razoável para os intervalos de temperaturas testados (de 18°C à 24°C).

Para uma melhor validação dos resultados e uma possível extensão da utilização deste método com grande exatidão, seria necessário obter esse fator  $\kappa$  em um intervalo de altas temperaturas, de preferência entre 35°C e 45°C, de modo que fosse possível observar se o comportamento desse fator ainda seria linear ou se teríamos que obtê-lo através de outras relações, como por exemplo, polinômios de temperatura.

### 5.3 Ensaio sob a Influência de Abertura Periódica de Porta

Neste ensaio, as mesmas considerações para o ensaio de consumo mínimo diário são aplicadas aqui, exceto pelo fato do ensaio ter sido realizado com a geladeira já estabilizada. O intuito deste ensaio é comparar o consumo energético obtido com o consumo do ensaio com portas fechadas e verificar se a influência da abertura periódica de porta é considerável mesmo quando o refrigerador se encontra vazio.

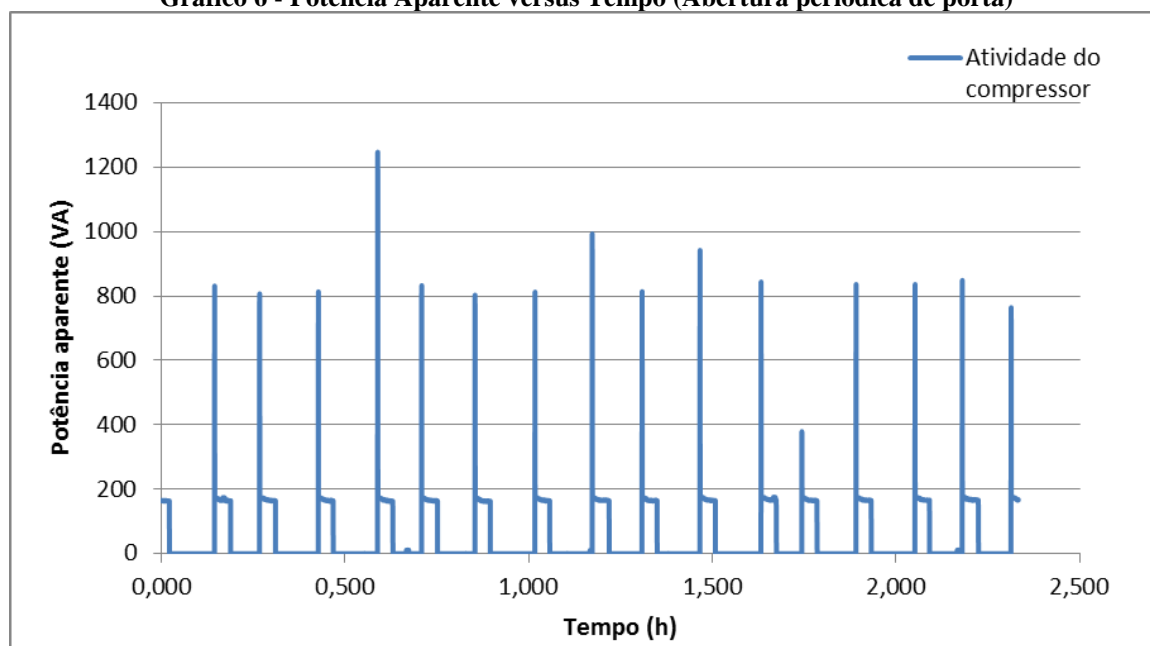
Ressalta-se que o ensaio foi realizado em 2:20 h, e que foram realizados 5 aberturas com a porta aberta durante 20 segundos, com o intervalo de 30 minutos entre cada abertura. A primeira abertura foi realizada após 10 minutos de o ensaio começar e o ensaio terminou 10 minutos depois da última abertura.

Na Tabela 13 são expostos os resultados do ensaio.

**Tabela 13 - Dados do ensaio com abertura periódica de porta**

Ensaio com abertura periódica de porta	
Fator de potência	0,625
Potência total dos picos [kW]	9,274
Potência total [kW]	177,974
Potência total dos picos/Potência total [%]	5,211
Temperatura ambiente média do ensaio (°C)	20,21
Tempo do compressor desligado [h]	1,638
Tempo do compressor ligado [h]	0,695
Tempo do compressor ligado [%]	29,779
Potência média necessária [kW]	0,021
Energia mínima média diária [kWh]	0,508
Energia mínima média mensal [kWh]	15,255

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Gráfico 6 - Potência Aparente versus Tempo (Abertura periódica de porta)**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

No Gráfico 6 ( Potência Aparente versus Tempo), nota-se que não há tentativas falhas do compressor ligar, como ocorreu no início do ensaio de 24 horas (vide Gráfico 4 e Gráfico 5) . Vale ressaltar que o ensaio começou com a geladeira já estabilizada.

Para que seja possível comparar valores energéticos entre o ensaio de consumo mínimo diário e ensaio de portas abertas periodicamente, é utilizada a metodologia proposta para corrigir a variação de temperatura para igualar os valores de temperatura ambiente dos ensaios considerados, utilizando o fator de correção  $\kappa$ . Além disso, será extraído o consumo

energético do *pull-down* do ensaio de consumo mínimo diário, já que o ensaio de porta aberta periodicamente foi realizado com a geladeira já estabilizada.

Consideraremos o Ensaio 2, cujo consumo mensal obtido foi 14,126 kWh e a temperatura ambiente média foi 21,08 °C. No ensaio de abertura periódica de porta a energia mensal teve o valor de 15,255 kWh e a temperatura ambiente média foi de 20,21 °C.

Primeiramente, calcularemos um novo consumo a partir do Ensaio 2 para temperatura de 20,21 utilizando a Equação 14:

$$C_{2 \text{ prev.}} = 1,117 \times (20,21 - 21,08) + 14,126 = 13,154 \text{ kWh}$$

Para corrigir o impacto do *pull-down* no consumo mensal, extraímos a parte relacionada a ele. No Ensaio 2, o consumo de energia durante o *pull-down* representou cerca de 8,9 % do consumo total. Então, devemos multiplicar o consumo calculado anteriormente por 0,911, que representa a parcela do consumo referente à geladeira já estabilizada. Então temos:

$$C_{2 \text{ corr.}} = 0,911 \times (13,154) = 11,983 \text{ kWh}$$

Esse  $C_{2 \text{ corr.}}$  representa o consumo de ensaio realizado com porta fechada para uma temperatura ambiente de 20,21 °C. Temos um consumo com porta aberta periodicamente igual a 14,126 kWh para uma mesma temperatura ambiente. Comparando estes dois valores, houve um aumento de quase 17,9 % no consumo somente em virtude da abertura periódica de porta. Isso demonstra o grande efeito provocado por este parâmetro no consumo, mesmo quando o refrigerador se encontra vazio.

#### 5.4 Ensaio com Abertura Permanente de Porta

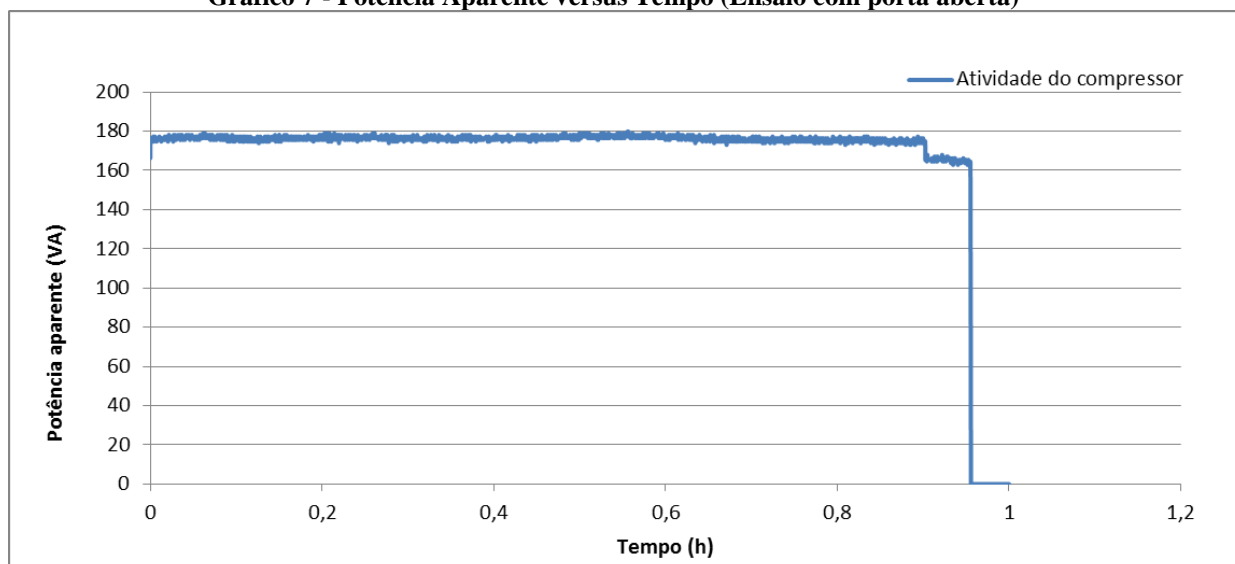
O intuito deste ensaio foi verificar como seria o comportamento do compressor em um regime extremamente forçado. Os resultados obtidos são expostos na Tabela 14:

**Tabela 14 - Dados do ensaio com abertura permanente de porta**

Ensaio com abertura permanente de porta	
Fator de potência	0,625
Potência total dos picos [kW]	0,882
Potência total [kW]	254,132
Potência total dos picos/Potência total [%]	0,347
Temperatura ambiente média do ensaio (°C)	23,72
Tempo do compressor desligado [h]	0,045
Tempo do compressor ligado [h]	0,955
Tempo do compressor ligado [%]	95,539
Potência média necessária [kW]	0,071
Energia mínima média diária [kWh]	1,694
Energia mínima média mensal [kWh]	50,826

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como a geladeira permaneceu de porta aberta durante o ensaio, o compressor se manteve em atividade durante a maior parte do tempo para compensar a convecção entre o ar frio do congelador e o ar quente do ambiente externo à geladeira. O Gráfico 7 mostra a potência aparente em função do tempo:

**Gráfico 7 - Potência Aparente versus Tempo (Ensaio com porta aberta)**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

No Gráfico 7, podemos verificar uma queda no valor da potência aparente, antes do equipamento se desligar. Isso se deve ao fato do valor da tensão ser uma constante no programa e naquele período especificamente ter ocorrido um aumento na tensão de modo que a corrente lida diminuísse e a potência calculada (que considera a tensão constante) também.

## 5.5 Comparação dos Resultados Obtidos com o Resultado do Teste do Inmetro

Embora os testes sejam realizados em condições diferentes, podemos usar o fator  $\kappa$  para corrigir a diferença de temperatura entre os testes realizados pelo autor e o teste do Inmetro. Ainda, de acordo com a observação de Geppert (2011), desprezaremos a influência da carga térmica do teste do Inmetro, porque este teste foi realizado em condições controladas.

Para calcular o Índice de Eficiência do refrigerador, precisamos do consumo padrão (Cp), que é calculado pela Equação 11. Já que o Inmetro fornece uma tabela com os valores do índice de eficiência e o consumo de energia mensal, utilizaremos estes valores para calcular o consumo padrão através da equação 10. Podemos fazer isso, pois o refrigerador utilizado é idêntico.

**Tabela 15 - Eficiência Energética - Refrigeradores**

FORNECEDOR	MARCA	MODELO	VOLUME INTERNO (l)				CONSUMO DE ENERGIA (kWh/mês)		ÍNDICE DE EFICIÊNCIA (C/Cp) (*)		AGENTE DE EXPANSÃO DA ESPUMA (**)	FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO		
			REFRIG	CONG			TOTAL	127 V	220 V	127 V		220 V	127 V	220 V
				+	++	+++								
ELECTROLUX	ELECTROLUX	R 250	214	26			240	24.1	24.1	0.867	0.867	R	B	B
ELECTROLUX	ELECTROLUX	RE 26 RE 28 RE 28A RE 31	214	26			240	23.7	23.7	0.853	0.853	C	A	A
ELECTROLUX	ELECTROLUX	R 280	236	26			262	24.8	24.8	0.867	0.867	R	B	B
ELECTROLUX	ELECTROLUX	RDE 30 RE 29 RW 34 RDE 33 RW 35	236	26			262	24.4	24.4	0.853	0.853	C	A	A
ELECTROLUX	ELECTROLUX	RDE 35	286	31			317	25.0	25.0	0.820	0.820	C	A	A
ELECTROLUX	ELECTROLUX	RDE 38	312	31			343	26.8	26.8	0.854	0.854	C	A	A
ELECTROLUX	ELECTROLUX	RE 35	236	26			262	19.5	19.5	0.682	0.682	C	A	A
ESMALTEC	ESMALTEC	ROC31	218	27			245	23.9	23.9	0.854	0.854	C	A	A
ESMALTEC	ESMALTEC	ROC35	232	27			259	21.9	21.9	0.768	0.768	C	A	A
GORENJE	GORENJE	R63397DE	390				390		30.3		0.929	C		B
MABE	CONTINENTAL	RUCT270	223	29			252	23.7	23.7	0.837	0.837	C	A	A

Fonte: Adaptado de Inmetro (2016)

Usando os valores de consumo de energia e do Índice de Eficiência Energética da Tabela 15 e explicitando o consumo padrão na Equação 10, temos:

$$C_p = \frac{C}{IE} = \frac{23,7 \text{ kWh}}{0,853} = 27,8 \text{ kWh}$$

Utilizaremos os valores do Ensaio 2 para aplicar o fator de correção  $\kappa$  e obter o consumo a 32 °C, que é a temperatura ambiente do teste do Inmetro. Usando a Equação 14, temos:

$$C = 1,117(32 - 21,08) + 14,126 = 26,3 \text{ kWh}$$

Utilizando a Equação 10 e os valores do consumo padrão ( $C_p$ ) e consumo à 32°C calculados anteriormente, temos:

$$IE = \frac{C}{C_p} = \frac{26,3}{27,8} = 0,946$$

A diferença entre os Índices de Eficiência entre o teste do Inmetro e o Ensaio 2 difere somente pelo consumo declarado, já que o valor de  $C_p$  é o mesmo.

Considerando o valor de consumo calculado para 32 °C, podemos retirar a parcela referente ao *pull-down*, de modo que se possa fazer uma comparação mais justa do consumo calculado e o ensaio do Inmetro. O *pull-down* referente ao Ensaio 2 representa a parcela de aproximadamente 8,9 % da energia total.

Então multiplicando o valor do consumo calculado para 32 °C por 0,911 é calculado um consumo mensal corrigido:

$$C_{\text{corr.}} = 26,3 \times 0,911 = 24,0 \text{ kWh}$$

O erro relativo percentual entre o consumo corrigido e o consumo do Inmetro é:

$$\varepsilon = \left( \frac{|24,0 - 23,7|}{23,7} \right) \times 100 = 1,27 \%$$

Feito esta consideração, o consumo calculado chega a um valor muito próximo ao do Inmetro, de modo que a metodologia empregada pode ser aplicada com bons resultados para estimar o consumo do refrigerador.



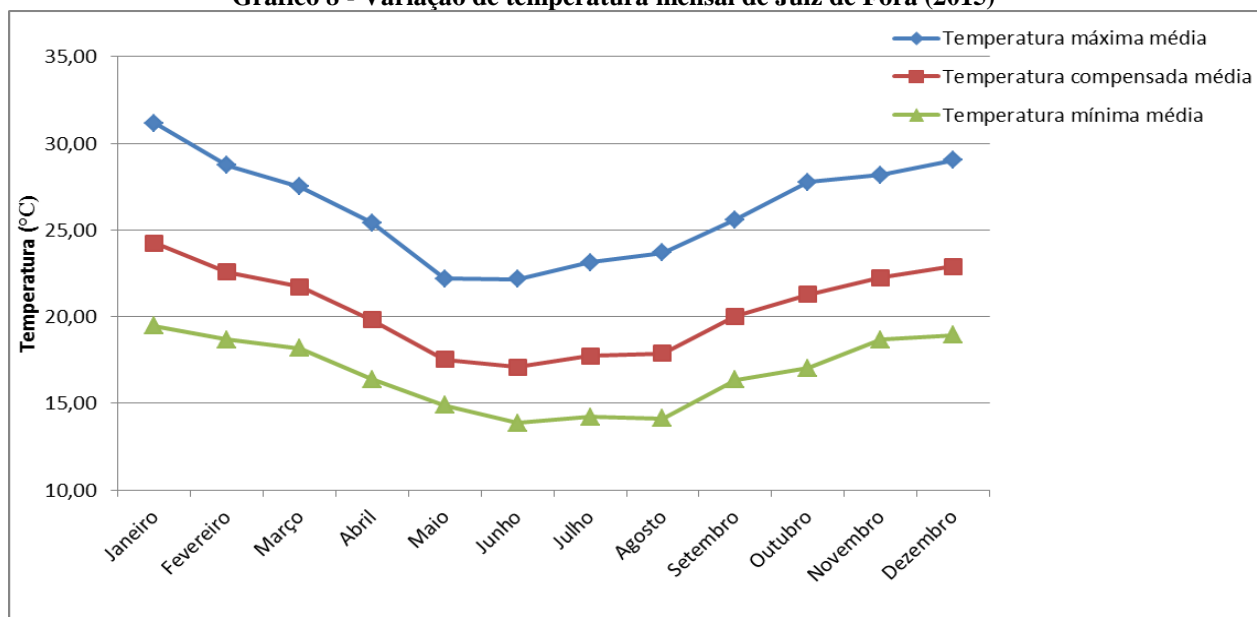
## **5.6 Proposta para um Método de Estimativa de Consumo Energético mais Próximo da Realidade**

Por causa da grande influência que a temperatura ambiente exerce no consumo de um refrigerador, podemos usar o fator  $\kappa$  para realizar correções na estimativa do consumo anual de um refrigerador, pois atenuaremos os efeitos das flutuações no valor da temperatura ambiente, sejam elas decorrentes da sazonalidade ou das características regionais. Para isso, basta usarmos dados meteorológicos do local que desejarmos. Foram utilizadas neste trabalho as informações dispostas no banco de dados do Inmet (2016), onde constam dados meteorológicos de diversas localidades, com fácil acesso em seu sítio eletrônico.

A título de exemplo, estimaremos o consumo anual do refrigerador testado no trabalho com bases nos dados coletados de temperaturas através do banco de dados do Inmet. As temperaturas disponíveis para consulta são: temperatura máxima média, temperatura mínima média e temperatura média compensada. Em estações convencionais, os observadores fazem leituras periódicas (geralmente a cada 6 horas) dos termômetros, que registram as temperaturas máxima e mínima de maneira automática. A temperatura máxima média é a média dos valores de temperatura máxima dentro do intervalo de tempo considerado. De maneira análoga à temperatura média máxima, a temperatura mínima média é calculada. Já a temperatura média compensada é calculada através da média de cinco valores: três leituras realizadas a cada seis horas, a temperatura máxima registrada e a temperatura mínima registrada. Isto se deve ao fato do observador não estar trabalhando no período da madrugada e não poder ler um quarto valor neste período.

O Gráfico 8 exibe os dados destas três temperaturas ao longo do ano de 2015, na cidade de Juiz de Fora:

Gráfico 8 - Variação de temperatura mensal de Juiz de Fora (2015)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com base no INMET (2016)

Iremos calcular o consumo referente a cada mês com base no modelo proposto para corrigir a influência da temperatura ambiente no consumo e usaremos o valor de consumo de referência igual ao obtido através do Ensaio 2. Os valores de temperatura compensada média serão utilizados como as temperaturas médias mensais para o cálculo do consumo mensal. Além disso, removeremos a influência do *pull-down* no consumo, multiplicando o valor do consumo anual final por 0,911 (excluindo o valor do consumo energético do *pull-down* deste ensaio, que equivale a 8,9 % do consumo total), de forma a chegar um consumo anual corrigido. A Tabela 16 mostra o resultado para o consumo mínimo anual:

**Tabela 16 - Consumo mínimo anual**

Mês	Temperatura média (°C)	Consumo (kWh)
Janeiro	24,26	17,676
Fevereiro	22,58	15,802
Março	21,72	14,846
Abril	19,82	12,722
Maio	17,54	10,173
Junho	17,10	9,684
Julho	17,75	10,405
Agosto	17,88	10,551
Setembro	20,02	12,944
Outubro	21,30	14,367
Novembro	22,24	15,422
Dezembro	22,89	16,144
Consumo Anual (kWh)		160,735
Consumo Anual corrigido (kWh)		146,430
Fator $\kappa$ (kWh/°C)	1,117	
Consumo do ensaio (kWh)	14,126	
$T_{med}$ ensaio (°C)	21,08	

**Fonte: Elaborado pelo próprio autor**

Como esta análise abrange a variação de temperatura ao longo do ano de uma cidade, ela abrange as flutuações de temperatura tanto sazonais como regionais, de modo que se possa fazer uma análise mais abrangente.

A influência da variação climática regional brasileira no consumo energético de refrigeradores já foi abordada por Cardoso (2008), que aponta o problema da temperatura utilizada nos ensaios do PBE não ser representativa para todas as regiões. Então, utilizando a temperatura referente ao local de uso do refrigerador chega-se a um consumo mais coerente com a realidade.

Já a influência da variação de temperatura no consumo energético devido à sazonalidade deve ser estudada para uma melhor caracterização do consumo energético do refrigerador ao longo do ano, visto que através dela é possível prever os meses com maiores consumos de energia. Visto que o refrigerador é um dos eletrodomésticos que mais consomem energia elétrica, através dessa análise é possível afirmar que é natural que a conta de luz das residências tende a subir de preço nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, que são os meses com maiores temperaturas, partindo da premissa que os consumidores mantenham seus hábitos em relação ao uso dos equipamentos eletrodomésticos.

## 6. CONCLUSÕES

Uma grande barreira encontrada em ensaios realizados segundo normas específicas é a necessidade de um ambiente controlado, o que é algo necessário para realizar a comparação de equipamentos diferentes, visto que eles serão testados nas mesmas condições. Como a influência da temperatura ambiente é um dos fatores mais impactantes na energia consumida pelos refrigeradores, foi proposta uma metodologia para corrigir a influência da variação de temperatura entre testes, de modo que esta metodologia foi testada com sucesso. É importante frisar que seria interessante testar a metodologia para temperaturas ambientes mais altas, de preferência maiores que 35 °C, uma vez que no Brasil existem algumas regiões que valores de temperatura superiores a 35 °C são corriqueiros, principalmente no verão.

Outro objetivo do trabalho, que era propor a obtenção do consumo de refrigeradores através de um ensaio de baixo custo, foi obtido com êxito, utilizando um aparato instrumental e uma metodologia simples. Todavia, incrementar o aparato de forma que seja possível medir a voltagem também de maneira instantânea é uma sugestão para que sejam conseguidos resultados mais precisos.

Outro fator analisado no trabalho foi a influência da abertura de porta no consumo quando o refrigerador se encontra vazio, sendo verificado um impacto significativo na energia consumida pelos refrigeradores causado pela abertura de porta. Desta maneira, devemos evitar abrir a porta e também evitar deixá-la aberta sem necessidade sempre que possível.

A parcela de energia referente ao *pull-down* foi analisada e representou uma quantidade considerável no consumo. Sabemos que as pessoas não desligam a geladeira com frequência e com base nisso podemos afirmar que quando os valores de consumo energético dos testes realizados neste trabalho são extrapolados para obter uma média mensal, esses valores são majorados. Isso se deve ao fato de que o refrigerador só vai realizar o *pull-down* no início e não todos os dias. Retirar a parte referente ao *pull-down* faz com que os cálculos para grandes períodos de tempo ofereçam estimativas mais precisas do consumo de energia.

Recomenda-se para trabalhos futuros um estudo aprofundado sobre o isolamento térmico das paredes dos refrigeradores, visto que o valor da condutividade térmica é de crucial importância na eficiência energética.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Igor M. G. **Performance comparativa entre R290/R600A (50:50) e R134A para drop-in em refrigerador doméstico**. 2010. 163p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ANSI/ASHRAE Standard 117-1992, **Method of Testing Closed Refrigerators**, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, 1992

ANSI/NSF Standard 7-99, **Commercial Refrigerators and Freezers**, National Sanitation Foundation International, 1999

BAJAY, Sérgio Valdir. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: experiências internacionais em eficiência energética para a indústria** / Sérgio Valdir Bajay, Paulo Henrique de Mello Sant Ana, – Brasília: CNI, 2010. 88 p.

BRASIL. Lei nº 10.295. Dispões sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 de outubro de 2001. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LEIS\\_2001/L10295.htm](http://www.planalto.gov.br/http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm)>. Acesso em 14 fev. 2016.

CARDOSO, Rafael B. **Avaliação da Economia de Energia atribuída ao Programa Selo PROCEL em Freezers e Refrigeradores**. 2008. 179p. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A.H.; HADDAD, J. Economic feasibility for acquisition of efficient refrigerators in Brazil. **Applied Energy**, 87, 2009.

CARMEIS, Dean W. M. **Os efeitos da diversidade de tensões de distribuição no setor elétrico brasileiro. Estudo do Caso do Refrigerador Doméstico**. 2002. 132p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ELETROBRAS PROCEL. **Relatório de Resultados 2016: ano base 2015**. Relatório Completo. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em 01 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Regulamento para concessão do selo PROCEL de economia de energia**. (Revisão – IV). Ago. 2013. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em 01 jul. 2016.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Nota técnica DEA 10/14: “Consumo de Energia no Brasil”**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Rio de Janeiro/RJ. 2014. Acesso em 14 fev. 2016.

GEPPERT, Jasmin. **Modelling of domestic refrigerators’ energy consumption under real life conditions in Europe**. 2011. 136p. Dissertação (Mestrado) - Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany.

INMET. **BDMEP**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

INMETRO. **Regulamento específico para uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – linha de refrigeradores e assemelhados**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2005. 35p. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

\_\_\_\_\_. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – REFRIGERADORES**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2016. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/refrigeradores.pdf>>. Acesso em: 01 de jul. 2016.

ISO 7371:1995 Household refrigerating appliances – **Refrigerators with or without low-temperature compartment** – Characteristics and test methods.

ISO 8187:1991 Household refrigerating appliances – **Refrigerator-freezers** – Characteristics and test methods.

ISO 8561:1995 Household refrigerating appliances – **Refrigerators, refrigerator-freezers, frozen food storage cabinets and food freezers cooled by internal forced air circulation** – Characteristics and test methods.

ISO 5155:1995 Household refrigerating appliances – **Frozen food storage cabinets and food freezers** – Characteristics and test methods.

KHAN, M. I. H.; AFROZ, H. M. M.; ROHOMAN, M. A.; FARUK, M.; SALIM M.. Effect of Different Operating Variables on Energy Consumption of Household Refrigerator. **International Journal of Energy Engineering (IJEE)**, Aug. 2013, Vol.3 Iss, PP. 144-150.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Circuitos Elétricos**. 8. Ed. São Paulo: Pearson, 2009. 592p.

NTB00048, 1992. **Refrigeradores, Congeladores e Aparelhos Similares - Abaixamento de Temperatura - “Pull down” - Método de Ensaio**. Norma técnica Brasmotor, Grupo Brasmotor S. A., Joinville - SC.

OPENENERGYMONITOR. Disponível em: <<https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>>. Acesso em: 01 fev. 2016.

PORTASIO, J. M., **Manual Prático de Refrigeração: doméstica, comercial, industrial e para automóveis**, Editora Aurora, Rio de Janeiro, 1982, 244 p.

REFRIGERATION & AIR CONDITIONING: **40 lessons on refrigeration and air conditioning from IIT Kharagpur**. Useful training.... Kharagpur: EE IIT, 2008. Disponível em:<[http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New\\_index1.html](http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html)>. Acesso em: 27 fev. 2016.

SALVADOR, Emerson. **Eficiência energética em refrigeradores**. 2013. 93p. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

SEIDEL, Roberto. **Análise da performance e da distribuição de fluxo de calor num refrigerador doméstico**. 2001. 97p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

SILVA JR, Herculano X. **Aplicação das metodologias de análise estatística e de análise do custo do ciclo de vida (ACCV) para o estabelecimento de padrões de eficiência energética: refrigeradores brasileiros**. 144p. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W.. **Refrigeração e Ar Condicionado**. Rio de Janeiro: Makron, c1985. 481p.

U.S. Department of Energy. **Appliance and Equipment Standards Rulemakings and Notices**. Washington. Disponível em:  
< [https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance\\_standards/product.aspx/productid/52](https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/product.aspx/productid/52) >. Acesso em: 14 fev.2016.

VENDRUSCULO, Edson Adriano; QUIROZ, Guilherme de Castilho; JANNUZZI, Gilberto De Martinho; POMILIO, José Antônio; BORGES, Thomaz. Technical improvement of residential refrigerator in Brazil: energy efficiency analysis, In **Anais do EEDAL 2003**, Torino, CD-ROM, 2003, pp 1-7.

VENTURINI, Osvaldo José; PIRANI, Marcelo José. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2005. 315p. (Livro técnico PROCEL).

WEG. **Manual para correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul-SC: WEG Automação S.A., 2015. 37 p. Disponível em: <<http://www.weg.net>>. Acesso em: 04 de jul. 2016.

WESTPHALEN, D., “Application of Best Industry Practices to the Design of Efficient Commercial Refrigerators”. In: **INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE**, 21., 2002. Proceedings... [s.l.]: [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1611&context=iracc>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

ZIMMERMANN, A.J. P.; DUARTE, P.O.O.; PRATA A. T.; MELO, C. Análise comparativa de desempenho entre um refrigerador termoelétrico e um refrigerador por compressão de vapor. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 9., 2002, Itajubá. *Resumos...* Disponível em: < <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/creem/2002/TF/TF006.pdf> >. Acesso em: 04 jul. 2016.

## APÊNDICE 1 – PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO

```
#include <OneWire.h>
```

```
#include <DallasTemperature.h>
```

```
#include "EmonLib.h"
```

```
EnergyMonitor emon1;
```

```
#define ONE_WIRE_BUS 10 // Conectar o pino central dos sensores ao pino 10 do Arduino
```

```
#define TEMPERATURE_PRECISION 10 // Resolução das medidas de temperatura. No  
caso, 10 bits gera resoluções de 0,25 graus Celsius
```

```
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Setar uma instância oneWire para comunicar com  
dispositivos OneWire
```

```
DallasTemperature sensors(&oneWire); // Passar a referência do oneWire para Dallas  
Temperature.
```

```
//ALOCA UM ENDEREÇO DE SENSOR A UMA VARIÁVEL
```

```
DeviceAddress one_Thermometer = { 0x28, 0xFF, 0xAC, 0x17, 0x41, 0x04, 0x00, 0x45 };
```

```
DeviceAddress two_Thermometer = { 0x28, 0xFF, 0x12, 0x1A, 0x43, 0x04, 0x00, 0x7A };
```

```
DeviceAddress three_Thermometer = { 0x28, 0xFF, 0x31, 0x18, 0x43, 0x04, 0x00, 0xCB };
```

```
int rede = 123.0; //variável de tensão da rede
```

```
int pino_sct = 1; // endereço do pino analógico do arduino ligado ao sensor SCT (corrente)
```

```
int row=0; // utiliza-se as variáveis row e LABEL para imprimir os valores de em uma tabela  
do Excel através do PLX-DAQ
```

```
int LABEL=1;
```

```
void setup(void)
```

```
{
```

```
Serial.begin(9600); // Inicialização da porta serial
```

```
sensors.begin(); // Inicialização dos sensores
```

```
sensors.setResolution(one_Thermometer, TEMPERATURE_PRECISION);
```

```
sensors.setResolution(two_Thermometer, TEMPERATURE_PRECISION);
```

```
sensors.setResolution(three_Thermometer, TEMPERATURE_PRECISION);
```



emon1.current(pino\_sct, 20); // 20 é a constante da corrente, definida pelo valor que eu quero ler quando 1 V é produzido através do resistor de carga.

```
Serial.println("CLEARDATA");
```

```
Serial.println("LABEL, TIME, Sensor_1 (C), Sensor_2 (C), Sensor_3 (C),Current (A), Power (VA)"); // Definindo os campos para a aquisição de dados para o Excel a partir do PLX-DAQ
}
```

```
void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
```

```
{
float tempC = sensors.getTempC(deviceAddress); //alocar as temperaturas dos sensores em graus Celsius na variável tempC
Serial.print(tempC);
}
```

```
void loop(void)
```

```
{
row++;
double Irms = emon1.calcIrms(1480); //Calcula a corrente RMS
sensors.requestTemperatures(); // requisita leituras dos sensores
// Impressão do horário e dos valores lidos dos sensores em uma tabela de Excel.
Serial.print("DATA,TIME,");
printTemperature(one_Thermometer);
Serial.print(",");
printTemperature(two_Thermometer);
Serial.print(",");
printTemperature(three_Thermometer);
Serial.print(",");
Serial.print(Irms);
Serial.print(",");
Serial.print(Irms*rede);
Serial.print(",");
Serial.println(row); // impressão do número da medida
if (row>100000)//criar um laço para limitar o número de medidas
```

```
{  
row=0;  
Serial.println("row, SET, 2");  
}  
delay(1000); // tempo de aquisição de dados  
}
```

**ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria e não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, audiovisual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte. Declaro por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 29 de junho de 2016.

---

Nome completo do autor

---

Matrícula

---

Assinatura

---

CPF

---

<sup>1</sup> LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano ou multa.