



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DANIEL LOPES DO AMARAL

**MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM REFRIGERADOR  
TERMOELÉTRICO: CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO  
APLICADO À REGULAÇÃO DA TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE  
ÁGUA GELADA**

FORTALEZA

2013

DANIEL LOPES DO AMARAL

**MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM REFRIGERADOR  
TERMOELÉTRICO: CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO  
APLICADO À REGULAÇÃO DA TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE  
ÁGUA GELADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:  
Prof. Dr. Bismark Claure Torrico

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

---

A513m Amaral, Daniel Lopes do.

Melhoria na eficiência energética de um refrigerador termoelétrico: controle preditivo baseado em modelo aplicado à regulação da temperatura do reservatório de água gelada / Daniel Lopes do Amaral – 2013  
67 f. : il. color., 30 cm.

Dissertação (mestrado): Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2013

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica  
Orientação: Prof. Dr. Bismark Claure Torrico

1. Engenharia Elétrica. 2. Controlador Preditivo. 3. Refrigeração. I. Título.

CDD 621.3

---

DANIEL LOPES DO AMARAL

**MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO: CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO APLICADO À REGULAÇÃO DA TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA GELADA**

Esta dissertação foi considerada adequada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração Sistemas de Energia Elétrica. Aprovada em Fortaleza, 31 de Julho de 2013, pela banca examinadora:

---

Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD  
Coordenador PPGEE

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Bismark Claure Torrico, Dr.  
Orientador

---

Prof. Fabrício Gonzalez Nogueira, Dr.  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Guilherme de Alencar Barreto, Dr.  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof<sup>a</sup>. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis, Dr.  
Universidade Federal do Ceará

## DEDICATÓRIA

*À Maria Amélia Lopes do Amaral (in memorian) que me ensinou que criticar é amar.*

*A fé e a razão constituem as duas asas pelas quais o espírito humano se eleva para a contemplação da verdade.*

Papa João Paulo II

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder a felicidade de vivenciar esperanças e me acompanhar nos desafios inquietantes.

Aos meus pais que foram responsáveis por me transmitir o significado do amor desinteressado e me fazer acreditar na felicidade.

Aos meus irmãos que me provocam diariamente o exercício da fraternidade verdadeira e companheirismo.

Aos amigos que cultivei pelo prazer em experimentar a diversidade nas formas de ser, pensar, expressar e agir.

Ao meu orientador Professor Dr. Bismark Claure Torrico pela confiança, compreensão e paciência durante os últimos dois anos de convivência e trabalho.

Aos membros da banca examinadora que expuseram suas críticas a respeito da pesquisa realizada visando a materialização de um projeto acadêmico, profissional e pessoal.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica que contribuíram para minha formação acadêmica e humana durante as disciplinas ministradas.

Aos funcionários que me apoiaram na caminhada durante o curso compreendendo minha forma de ser e fazer.

## RESUMO

O uso racional de recursos é pauta recorrente nas discussões acerca do desenvolvimento sustentável e tem estimulado o projeto de equipamentos mais eficientes quanto ao consumo de energia elétrica. Agentes regulamentadores e certificadores estabelecem regras para o funcionamento e para a classificação de eletrodomésticos quanto ao consumo de energia elétrica a fim de formalizar a relação entre o desempenho dos mesmos e a manutenção indefinida dos recursos. Nesse contexto, lança-se mão do projeto de um controlador preditivo baseado em modelo aplicado à regulação da temperatura do reservatório de água gelada de um refrigerador termoelétrico obedecendo as especificações da norma internacional ANSI18 que determina condições funcionais para bebedouros com refrigeração mecânica incorporada, concomitantemente buscando atender aos requisitos para a certificação ENERGY STAR® quanto ao critério de eficiência energética. Para tanto foram realizadas as etapas de i) Modelagem e Identificação do Processo: foi desenvolvido um modelo em termos de função de transferência do sistema de refrigeração termoelétrico de fluidos através de modelagem fenomenológica; foram realizados experimentos para a identificação de parâmetros de modelos discretos pelo método caixa branca; foi desenvolvido critério de seleção de modelo baseado na capacidade de simulação e características do resíduo de simulação; ii) Estudo do Controlador Preditivo Baseado em Modelo: foi projetado e implementado na planta um controlador preditivo baseado em um dos modelos parametrizados para regulação da temperatura do reservatório interno; foi analisado o desempenho do controlador segundo a norma regulamentadora; iii) Estudo da Eficiência do Controlador: foi analisado o desempenho do controlador quanto a capacidade do protótipo em atender aos requisitos que o qualificam à obtenção de certificado segundo critério de eficiência energética para regulação da temperatura interna do reservatório e, por fim, realizado um estudo comparativo entre a estratégia de controle biestável aplicada atualmente ao processo e a estratégia proposta.

**Palavras-chave:** Refrigerador Termoelétrico. Sistemas de Refrigeração. Bebedouro Eletrônico. Eficiência Energética. Controle Preditivo Baseado em Modelo. Controle de Temperatura.

## ABSTRACT

The rational use of resources is a recurring theme in sustainable development discussions and has stimulated the development of more efficient electrical power consumption appliances. Regulators and Certifiers agencies set standards for the functionality requirements and for the electric power consumption classification of devices in order to formalize the relationship between performance and maintenance of these resources indefinitely. Thus a model based predictive controller was applied to a thermoelectric cooler to attain the international standard ANSI18 specifications for water cooler dispensers and to meet ENERGY STAR® energy efficiency requirements. A phenomenological linear model was obtained and the respective parameters were identified by using least squares algorithm; experiments were performed to identify the parameters of the discrete transfer functions; a model criterion selection based on simulation capabilities and residue characteristics was developed; a model based predictive controller was designed and applied using one of the models identified; the controller performance was analyzed attending to the ANSI18 standard and according to energy performance certificates; a comparative study between the bistable control and the proposed strategy was made for performance analysis. Simulation and experimental tests have shown compromise between the simulation capability and residue characteristic criterion. The closed loop system behavior allowed energy saving in standby temperature regulating compared to thermostat control mode. The new control strategy achieved ENERGY STAR® energy-efficiency criteria certification requirements infeasible for traditional regulation.

**Keywords:** Thermoelectric Cooler. Refrigeration Systems. Electronic Water Cooler Dispenser. Energy Efficiency. Model Based Predictive Control. Temperature Control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Módulos termoelétricos . . . . .	5
Figura 2	Esquema: módulo peltier. . . . .	6
Figura 3	Bebedouros comerciais . . . . .	7
Figura 4	Esquema Patente US2912142. . . . .	8
Figura 5	Esquema ciclo de compressão. . . . .	9
Figura 6	Equipamentos: Princípio de refrigeração por Compressão . . . . .	9
Figura 7	Bebedouros: Estrutura Interna. . . . .	11
Figura 8	Reservatório de água refrigerada . . . . .	12
Figura 9	Fluxo de energia térmica no reservatório de água refrigerada . . . . .	12
Figura 10	Componentes do reservatório de água refrigerada . . . . .	13
Figura 11	Bancada Experimental. . . . .	15
Figura 12	Esquemático: Volume de controle. . . . .	16
Figura 13	Curva carcterística NTC: $R_0 = 100K$ , $T_0 = 25^{\circ}C$ e $\beta = 3990$ . . . . .	18
Figura 14	Curva carcterística NTC linearizado: circuito de linearização. . . . .	19
Figura 15	Integração de Módulos. . . . .	20
Figura 16	Equacionamento do Sistema Térmico: Carga Térmica Genérica $Q_L$ . . . . .	23
Figura 17	Equacionamento do Sistema Térmico: Efeito Convectivo Fluido. . . . .	28
Figura 18	Resposta ao Degrau de Corrente: Limites Operacionais. . . . .	34
Figura 19	Resposta do Sistema e Excitação PRBS. . . . .	34
Figura 20	Resposta Experimental e Simulada. . . . .	37
Figura 21	Autocorrelação do Resíduo Filtrado por $\tilde{H}^{-1}(z, \bar{I}_0 = 1,00A)$ . . . . .	37
Figura 22	Controle Termostático da Temperatura Ambiente. . . . .	38
Figura 23	Resposta Experimental e Simulada para PRBS ( $T_b = 7$ minutos, $\eta = 8$ ). . . . .	38
Figura 24	Estrutura Geral do MBPC. . . . .	39
Figura 25	Estratégia de Horizonte Deslizante. . . . .	40
Figura 26	Influência do parâmetro $\lambda$ : período de fechamento de malha. . . . .	50
Figura 27	MBPC: Região linear. . . . .	51
Figura 28	MBPC: Saturação do sinal de controle. . . . .	52
Figura 29	MBPC: não-linearidade. . . . .	52

Figura 30	Termostato: Rejeição de Perturbação.	53
Figura 31	MBPC: Rejeição de Perturbação.	53
Figura 32	Consumo de Energia: Termostato - Set-point Temperatura Mínimo.	54
Figura 33	Consumo de Energia: MBPC - Set-point Temperatura Mínimo.	55
Figura 34	Consumo de Energia: Termostato - regulação em $10 \pm 1^\circ C$ .	56
Figura 35	Consumo de Energia: MBPC - regulação em $10 \pm 1^\circ C$ .	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ordem dos modelos, índices e regressores $T_s = 300s$	36
Tabela 2	Critério de Qualificação ENERGY STAR®.	55
Tabela 3	Consumo×Economia de Energia Elétrica.	57

## **LISTA DE SIGLAS**

- (ARMAX) Auto Regressive Moving Average with Exogenous Input  
(ARIMA) Auto Regressive and Integrated Moving Average  
(CARIMA) Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average  
(CC) Corrente Contínua  
(CPBM) Controle Preditivo Baseado em Modelo  
(FPE) Akaike's Final Prediction Error  
(GPC) Generalized Predictive Control  
(IEC) International Electrotechnical Commission  
(MBPC) Model Based Predictive Control  
(MIMO) Multiple Input - Multiple Output  
(NBR) Norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)  
(NTC) Negative Temperature Coefficient  
(PRBS) Pseudo Random Binary Signal  
(QP) Quadratic Programming  
(RHC) Receding Horizon Control  
(SISO) Single Input - Single Output  
(TEC) Thermoelectric Cooler  
(ZOH) Zero-Order Hold

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivo do Trabalho . . . . .	2
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	3
<b>2 REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS</b>	<b>5</b>
2.1 Módulos Termoelétricos . . . . .	5
2.2 Aplicações Tecnológicas . . . . .	7
2.3 Bebedouros com Refrigeração Mecânica Incorporada . . . . .	8
2.4 Bebedouros com Refrigeração Termoelétrica . . . . .	11
2.5 Perspectivas Tecnológicas . . . . .	13
<b>3 BANCADA EXPERIMENTAL</b>	<b>15</b>
3.1 Plataforma de Ensaio . . . . .	15
3.2 Medições . . . . .	16
3.3 Instrumentação . . . . .	17
3.3.1 Medição da Temperatura na Faces do Módulo Termoelétrico . . . . .	17
3.3.2 Medição da Temperatura no Reservatório de Água Gelada . . . . .	17
3.3.3 Medição da Temperatura Ambiente . . . . .	20
3.3.4 Medição da Diferença de Potencial Elétrico no Módulo Termoelétrico	20
3.3.5 Medição da Corrente Elétrica Drenada ao Módulo Termoelétrico .	20
3.4 Integração do Módulos . . . . .	20
<b>4 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>22</b>
4.1 Objetivos da Modelagem e Identificação . . . . .	22
4.2 Modelo Dinâmico do Processo . . . . .	22
4.2.1 Equacionamento do Sistema Térmico com Carga Genérica $Q_L$ . . . . .	23
4.2.2 Linearização do Modelo . . . . .	25
4.2.3 Função de Transferência do Processo . . . . .	26

4.2.4	Modelo para Sistema de Refrigeração Termoelétrico . . . . .	28
4.3	Identificação Experimental do Modelo do Processo . . . . .	31
4.3.1	Estrutura do Modelo e Erro de Predição . . . . .	32
4.3.2	Experimento de Identificação . . . . .	33
4.3.3	Critérios para Estimação de Parâmetros . . . . .	35
4.4	Função de Transferência do Processo . . . . .	36
<b>5</b>	<b>CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO</b>	<b>39</b>
5.1	Introdução . . . . .	39
5.2	Modelo do Processo . . . . .	41
5.3	Cálculo de Predições . . . . .	42
5.4	Função Custo . . . . .	44
5.5	Restrições . . . . .	45
5.5.1	Limites na Amplitude do Sinal de Saída . . . . .	45
5.5.2	Limites na Variação do Sinal de Controle . . . . .	46
5.5.3	Limites na Amplitude do Sinal de Controle . . . . .	46
5.6	Otimização da Função Custo . . . . .	47
5.6.1	Caso sem Restrições . . . . .	47
5.6.2	Caso com Restrições . . . . .	48
5.7	Horizonte Deslizante . . . . .	48
5.8	Ajuste dos Parâmetros do Controlador . . . . .	48
<b>6</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA DE CONTROLE</b>	<b>51</b>
6.1	Operação em Região Linear . . . . .	51
6.2	Operação com Saturação do Sinal de Controle . . . . .	51
6.3	Operação em Região Não-Linear . . . . .	52
6.4	Operação com Regulação Sujeito a Perturbação . . . . .	53
6.5	Medição da Eficiência Energética em Modo Standby . . . . .	54
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>62</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa destina-se a aplicação de uma estratégia de Controle Preditivo Baseado em Modelo na regulação da temperatura do reservatório de água gelada de um refrigerador termoelétrico comercial por meio do estudo da viabilidade da estratégia de controle conforme regulamentação compatível; da avaliação comparativa com respeito ao desempenho da estratégia de controle biestável e da aplicação da estratégia de controle proposta; e, da avaliação da eficiência energética da estratégia proposta conforme critérios de elegibilidade ao certificado ENERGY STAR® para eficiência energética.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável Rio+20 [1] ressaltou a necessidade de renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável. As autoridades mundiais participantes reiteraram o papel fundamental que a energia elétrica desempenha no desenvolvimento econômico, social e ambiental.

No Plano Nacional de Eficiência Energética [2] é explicitada a necessidade de mudança nos padrões de produção e consumo tendo em vista a manutenção dos recursos e apontando a necessidade de melhorar a eficiência energética em planejamento urbano, edifícios, transporte, produção de bens e serviços e projeto de produtos.

A melhoria da eficiência energética na concepção de novos produtos se insere nesse contexto como uma resposta da indústria à premente necessidade do uso racional dos recursos disponíveis e como um instrumento de diferenciação comercial tendo em vista as mudanças de atitude do consumidor.

Além da indústria e consumidores, os governos, as agências regulamentadoras, as associações e as organizações não governamentais participam desse processo com políticas de incentivos fiscais e financeiros à pesquisa e desenvolvimento, normas para funcionamento, certificações de eficiência energética e campanhas de conscientização voltadas para o consumo racional, por exemplo.

O desenvolvimento de bebedouros eletrônicos constitui uma alternativa comercial alinhada com o processo de busca pela eficiência energética para essa classe de equipamentos. O desenvolvimento rompe com o princípio de refrigeração baseado na compressão aos moldes da primeira patente norte americana US2912142 – 1957 [3] ao utilizar semicondutores na refrigeração do reservatório de água gelada. O uso de pastilhas termoelétricas está associado ao controle preciso de temperatura, à baixa emissão de ruídos e vibrações, à utilização em aplicações compactas e a não emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

A nova tecnologia de refrigeração baseada em semicondutores ainda não encontra especificações e requisitos na norma brasileira NBR 13972: Bebedouros com refrigeração mecânica incorporada – Requisitos de qualidade, desempenho e instalação [4]. Apenas a norma canadense C815: *Energy performance of drinking water coolers* [5] especifica requisitos para a tecnologia, antecipando-se às normas ANSI 18 [6], ARI 1010 [7] e UL 399 [8] que se referem somente ao princípio de refrigeração por compressão.

Além de carência de formalização quanto aos requisitos de qualidade, desempenho e instalação por meio de normas técnicas próprias à nova tecnologia aplicada aos bebedouros de mesa, o equipamento em estudo não é elencado no projeto de rotulagem voluntária do Ministério de Minas e Energia do Brasil denominado Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica: Procel [9] destinado a promover a produção de equipamentos visando o consumo racional de energia elétrica.

Por outro lado, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e a organização ENERGY STAR apresentaram neste ano a versão atualizada dos critérios de elegibilidade ao certificado destinado a identificar e promover equipamentos de refrigeração que utilizam recursos energéticos de forma eficiente [10].

O desenvolvimento de bebedouros termoelétricos encontra campo aberto para o desenvolvimento da tecnologia de refrigeração baseada no efeito peltier; para a formalização da regulamentação e para a elaboração de critérios de classificação de eficiência energética que venham a contribuir com o desenvolvimento econômico, social e ambiental.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

A pesquisa busca estabelecer meios para avaliar a capacidade da estratégia de Controle Preditivo Baseado em Modelo em qualificar o bebedouro eletrônico aos requisitos normativos e critérios de elegibilidade a certificado de eficiência energética. São enumeradas as etapas e principais entregas do projeto:

1. Substituição do sistema pré-existente de regulação por meio de termostato por protótipo utilizando um Projeto de Controlador Preditivo Baseado em Modelo:
  - Montagem da Bancada Experimental;
  - Modelagem do Processo;
  - Identificação e Parametrização de modelos da Planta;
  - Projeto do Controlador Preditivo Baseado em Modelo.

2. Avaliação da capacidade do protótipo em atender aos requisitos especificados nas normas brasileira NBR 13972 [4]: Bebedouros com refrigeração mecânica incorporada – Requisitos de qualidade, desempenho e instalação;
3. Qualificação do protótipo conforme critérios de elegibilidade ao certificado ENERGY STAR® [10] quanto à eficiência no consumo de energia elétrica para regulação da temperatura interna do reservatório por meio da sintonia do controlador proposto.

O Controle Preditivo Baseado em Modelo aplicado ao protótipo é uma alternativa de controle fundamentada em controle ótimo, isto é, estabelece o valor da variável de controle de forma a minimizar uma função objetivo que considera a regulação da variável de saída segundo uma referência pré-estabelecida ou trajetória de referência e, simultaneamente, o esforço de controle necessário para manutenção do valor de referência considerando as restrições nas variáveis de entrada e saída do processo na formulação do problema de optimização [11, 12].

A ponderação do esforço de controle, isto é, da energia necessária para regulação da variável de saída e o tratamento explícito das restrições nas variáveis do sistema na formulação do problema de minimização da função custo para estabelecimento da lei de controle justificam a aplicação da estratégia adotada considerando o objetivo de melhoria da eficiência do consumo de energia elétrica na regulação da temperatura do reservatório de água gelada em um refrigerador termoelétrico.

A aplicação do Controlador Preditivo Baseado em Modelo na regulação da temperatura do reservatório é realizada via protótipo, excluindo-se do escopo da pesquisa o projeto de sistema embarcado. A implementação por meio de hardware é sugerida como continuação das etapas realizadas nesta pesquisa.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao sistema em estudo destacando as motivações, principais objetivos previstos no projeto e limites do trabalho. São apresentadas as normas e certificações relacionadas ao funcionamento e eficiência energética do equipamento em estudo.

No capítulo 2 é realizada a caracterização do refrigerador termoelétrico tratando de aspectos relacionados à evolução técnica, princípios de refrigeração utilizados, estratégias de controle usuais, descrição dos principais componentes e especificação do refrigerador termoelétrico utilizado como protótipo.

No capítulo 3 é apresentada a bancada experimental destacando os aspectos relacionados a construção, instrumentação, especificação de componentes, integração dos módulos e características do protótipo. É detalhado o uso da bancada para experimentos de identificação e para controle.

No capítulo 4 é realizada a modelagem dinâmica fenomenológica da planta. É desenvolvido o experimento de identificação e realizada a parametrização de modelos do processo.

No capítulo 5 é formalizada a estratégia de Controle Preditivo Baseado em Modelo. É destacado um procedimento para ajuste dos parâmetros do controlador baseado no modelo identificado. É realizada a implementação do controlador utilizando o protótipo.

No capítulo 6 são relatados os experimentos para avaliação da capacidade do protótipo em atender os requisitos da norma NBR 13972 e critério de elegibilidade ao certificado ENERGY STAR®.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados experimentais obtidos por meio do protótipo. São descritas perspectivas futuras relacionadas ao projeto.

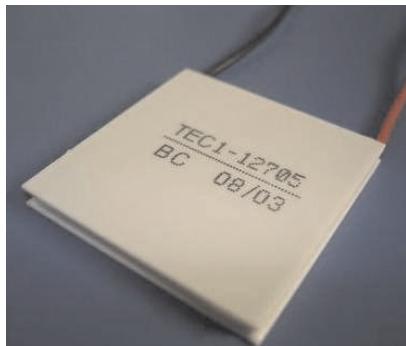
## 2 REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS

Este capítulo destina-se à caracterização de refrigeradores termoelétricos do ponto de vista construtivo, funcional, destaca vantagens e desvantagens da tecnologia de refrigeração baseada em semicondutores e oportunidades ainda não exploradas quanto à estratégia de controle associada aos equipamentos comerciais.

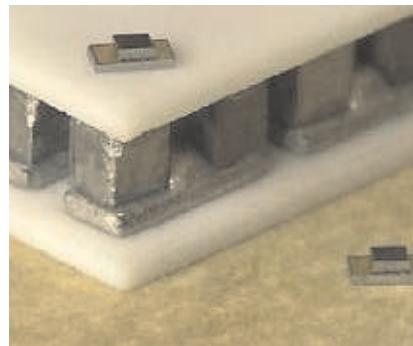
### 2.1 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Refrigeradores termoelétricos (TEC - *Thermoelectric Cooler*) são dispositivos baseados nas propriedades termoelétricas de materiais semicondutores. Os módulos TEC são utilizados frequentemente para manter a temperatura de um determinado volume de controle a uma referência tolerável por meio do bombeamento ativo de calor [13]. Para a termodinâmica, considera-se volume de controle a região do espaço limitada por uma superfície pela qual ocorre fluxo de energia na forma de calor e trabalho.

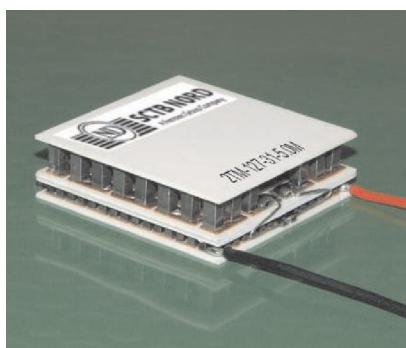
**Figura 1: Módulos termoelétricos**



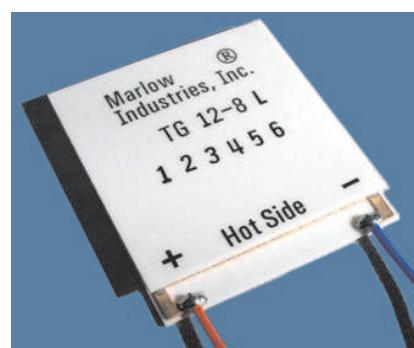
(a) Módulo termoelétrico típico.



(b) Detalhe: semicondutores dopados.



(c) Ferrotec Co.



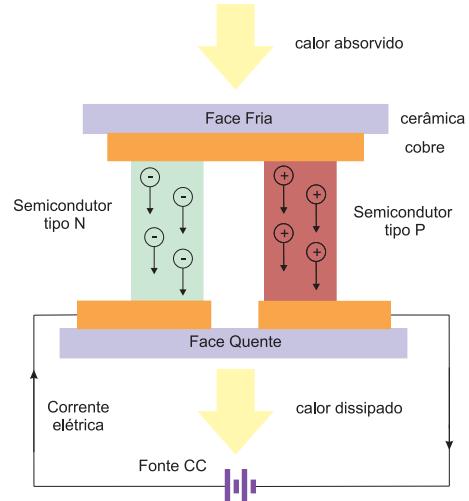
(d) Marlow Industries, inc.

Um módulo termoelétrico típico conforme a Figura 1a é formado por duas carcaças cerâmicas eletricamente isoladas nas quais são soldadas placas de cobre que conectam semicondutores dopados tipo p e n em detalhe na Figura 1b [14]. Um módulo composto por duas camadas de semicondutores é exibido na Figura 1c.

A diferença de temperatura entre as faces do módulo é resultado da absorção de energia térmica em uma das junções e liberação do calor na junção complementar conforme indicação na Figura 1d quando polarizado por corrente elétrica forçada. Um módulo termoelétrico permite a refrigeração ou aquecimento de um volume de controle conforme a polarização da corrente forçada ao qual é submetido e a disposição dos semicondutores.

Segundo o Efeito Peltier [15], durante a passagem forçada de portadores de carga elétrica entre metais ou semicondutores dissimilares ocorre a absorção ou liberação de energia para a transição de portadores entre os materiais conforme esquema na Figura 2.

**Figura 2: Esquema: módulo peltier.**



A transferência de calor e manutenção de temperatura nas superfícies das carcaças do módulo peltier estão condicionadas ao dimensionamento dos demais agentes que compõem o sistema termodinâmico e a intensidade da corrente elétrica circulante. No intuito de satisfazer os requisitos operacionais de temperatura e fluxo de energia térmica são associados ao módulo termoelétrico trocadores de calor, pastas térmicas, isolantes térmicos, fontes de corrente, sensores e estratégias de controle [16].

A maioria dos projetos de sistemas de refrigeração considera apenas as condições de regime permanente [17]. No entanto, a seleção do módulo termoelétrico e dimensionamento do sistema termodinâmico baseado no estado estacionário não garantem condições suficientes para manutenção de níveis toleráveis de temperatura do volume de controle na presença de perturbações, desgaste de componentes ou variáveis não modeladas.

O projeto condicionado às propriedades estáticas deve-se a dificuldade de modelar o comportamento dinâmico das grandezas que interagem no sistema [18]. Ainda assim, o número de aplicações tecnológicas de refrigeradores termoelétricos é crescente no campo militar e civil.

## 2.2 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

A tecnologia de refrigeração baseada nos semicondutores é empregada atualmente em diversos campos da Ciência e Tecnologia, desde as indústrias mais exigentes como as de equipamentos hospitalares, laboratoriais, aeroespaciais, semicondutores e telecomunicações, até as de equipamentos domésticos na fabricação de bens de consumo.

As Figuras 3a e 3b apresentam dois modelos nacionais de bebedouros de mesa que utilizam a tecnologia termoelétrica na refrigeração de água para consumo humano. Os refrigeradores termoelétricos tem sido empregados em equipamentos que exigem até 100 W de potência térmica [19]. A evolução das fontes de alimentação e sistemas de controle de temperatura tem impulsionado o desenvolvimento de novas aplicações.

**Figura 3: Bebedouros comerciais**



(a) **WD10E: Electrolux do Brasil S/A.** (b) **BR-e: Latina Eletrodomésticos S/A.**

O uso de módulos termoelétricos é justificado em aplicações que prezam pela confiabilidade, repetibilidade e baixa manutenção. São explorados em sistemas em que o controle da temperatura é fator crítico, além do uso mínimo de componentes, ausência de partes móveis, operação em qualquer direção e por não emitirem vibrações mecânicas.

Em refrigeradores a tecnologia dispensa o uso de gases refrigerantes reforçando o apelo ambiental e garantindo segurança desde a montagem até a manutenção em comparação aqueles que utilizam o princípio da compressão.

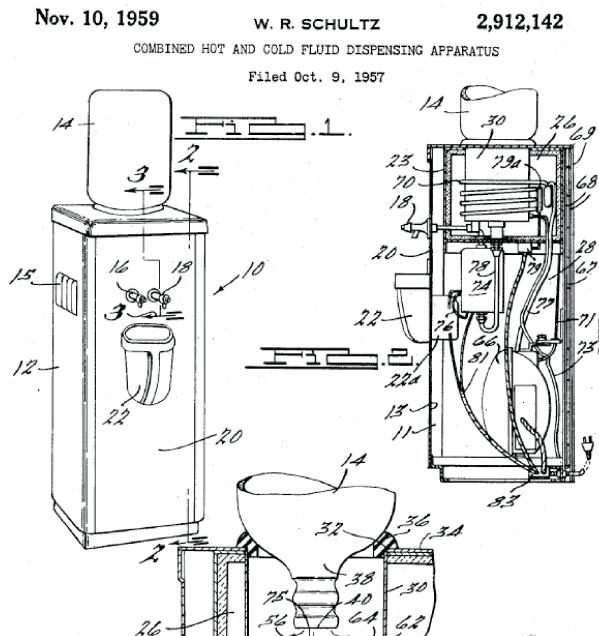
O peso e as dimensões dos eletrodomésticos termoelétricos são criticamente reduzidos, além do número de componentes no processos de fabricação, montagem e manutenção que viabilizam a logística dos produtos.

São fatores limitantes para incrementos na eficiência energética o desenvolvimento de fontes de alimentação e estratégias de controle associadas à regulação da temperatura. Bebedouros eletrônicos possuem coeficiente de performance menor que os que operam baseados nos motocompressores, ainda assim, estratégias de controle adequadas aplicadas aos TEC's permitem equiparar as duas tecnologias em relação ao consumo de energia elétrica.

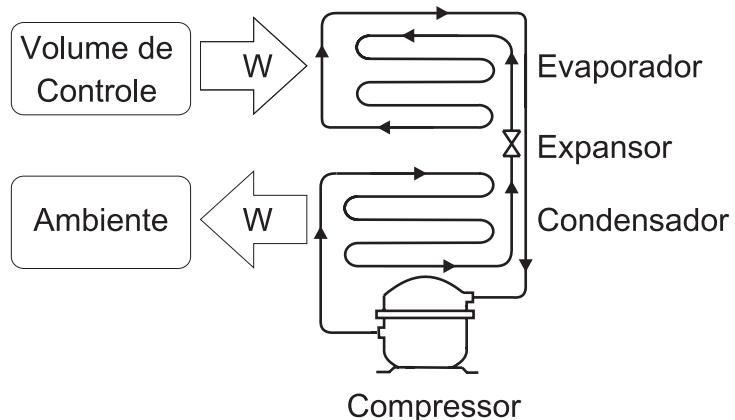
### 2.3 BEBEDOUROS COM REFRIGERAÇÃO MECÂNICA INCORPORADA

Bebedouros com refrigeração mecânica incorporada é o termo utilizado na norma NBR 13972 [4] para designar modelos de bebedouros de água autossuficientes que empregam motocompressores no princípio de refrigeração. Os bebedouros com refrigeração mecânica incorporada comerciais pouco se diferenciam funcionalmente daquele exposto na primeira patente americana US2912142 – 1957 [3], conforme Figura 4. Esse modelo utiliza condensadores, evaporadores, gases refrigerantes, válvulas de expansão, motocompressores e termostatos para regulação da temperatura do reservatório de água gelada.

**Figura 4: Esquema Patente US2912142.**



O ciclo de refrigeração baseado na compressão utilizado em bebedouros é esquematizado na Figura 5. Um fluido refrigerante no estado de líquido saturado é forçado por meio de um motocompressor a uma perda brusca de pressão no elemento expansor.

**Figura 5: Esquema ciclo de compressão.**

Na válvula de expansão ocorre uma transformação de estado tal que o fluido apresenta-se nas fases líquida e gasosa. No evaporador, durante a expansão, ocorre a absorção da energia térmica reduzindo a temperatura do volume de controle. A absorção de calor pelo fluido fornece energia para que ocorra transformação completa para fase gasosa durante a passagem pelo evaporador. O gás é succionado pelo motocompressor que o impele ao condensador com elevação da pressão e forçando a transformação completa de fase para o estado de líquido saturado com a dissipação de energia térmica para o meio e reiniciando o ciclo de refrigeração.

Em bebedouros com refrigeração mecânica incorporada o controle de temperatura do reservatório de água gelada é realizado por meio de termostato eletromecânico de bulbo a gás. O capilar do termostato permanece em contato térmico com o volume de controle e o gás interno expande ou comprime conforme o aumento ou diminuição da temperatura no reservatório. A mudança de volume do gás do termostato atua o gatilho mecânico que fecha ou abre circuito elétrico de acionamento do motocompressor.

**Figura 6: Equipamentos: Princípio de refrigeração por Compressão**

(a) Termostato ( Invesys Control Co ).



(b) Motocompressor ( Embraco SA).

O termostato encerra em um único dispositivo a função de elemento sensor e controlador biestável na malha de controle da temperatura. A Figura 6a exibe um termostato comercial destacando o cursor mecânico manual de seleção de ponto de comutação do gatilho (referência de temperatura). Os níveis de histerese para comutação da chave de acionamento biestável são condicionados aos aspectos construtivos, às propriedades mecânicas dos materiais utilizados e ao ponto operacional selecionado.

O motocompressor desempenha a função de atuador na malha de controle da temperatura do reservatório de água gelada. Conforme posição da chave biestável do termostato, o circuito de acionamento do motor é acionado impelindo o fluido refrigerante no circuito termodinâmico e realizando as trocas de energia ou desativado permitindo aquecimento passivo do volume de controle. A Figura 6b exibe um compressor comercial com as conexões mecânicas de sucção, compressão e manutenção e caixa de passagem para instalações elétricas.

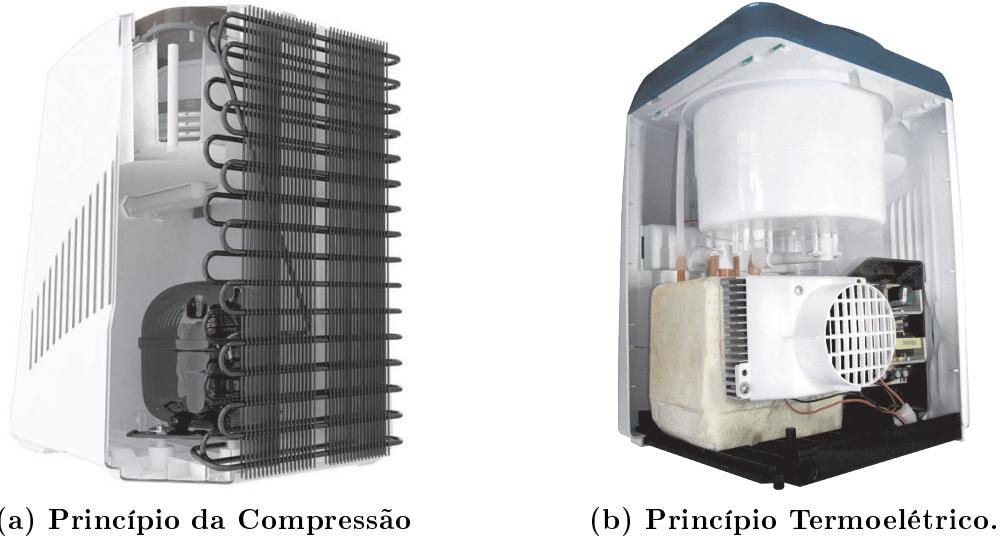
Os equipamentos representados na Figura 6 são utilizados da mesma forma descrita na patente US2912142 [3]. Melhorias no desempenho foram implementadas desde 1957, ainda assim o aspecto funcional permanece inalterado e a malha de controle é condicionada às características eletromecânicas dos elementos de sensoreamento, controle e atuação.

Características relacionadas à manutenção e repetibilidade são fortemente condicionadas aos aspectos eletromecânicos dos componentes relacionados na malha de controle. A presença de partes móveis contribui para o desgaste acelerado dos componentes do motocompressor e termostato. As características relacionadas ao ponto de operação tornam imprecisas a manutenção da referência de temperatura e nível de histerese segundo as propriedades físicas do fluido refrigerante e gás do termostato.

A estratégia biestável apresenta-se como uma alternativa de controle simples para manutenção da temperatura do reservatório de água gelada em bebedouros com refrigeração mecânica incorporada, porém o dimensionamento e manutenção dos componentes fica condicionado à forma cíclica de acionamento do atuador em carga plena, o que implica em sobredimensionamento dos componentes do circuito termodinâmico e oportunidades de melhoria na eficiência energética.

A Figura 7a apresenta a estrutura funcional de um bebedouro que utiliza o princípio de compressão na refrigeração de água potável. O circuito termodinâmico formado pelo condensador, expansor, evaporador e motocompressor é mostrado na figura em questão. Destaca-se as dimensões do condensador na parte traseira, o volume interno que o motocompressor requer e a necessidade de envolver o reservatório refrigerado com o expansor, evaporador e capilar do termostato para controle da temperatura da água gelada.

**Figura 7: Bebedouros: Estrutura Interna.**



## 2.4 BEBEDOUROS COM REFRIGERAÇÃO TERMOELÉTRICA

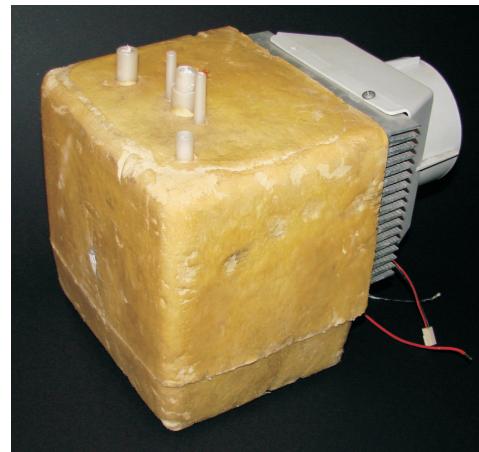
Bebedouros com refrigeração termoelétrica utilizam módulos Peltier como sistema de bombeamento ativo de calor a partir do reservatório de água gelada para o ambiente externo. A face fria do módulo permanece em contato térmico com a água a ser refrigerada enquanto que a face quente dissipava calor para o meio externo.

Nos bebedouros eletrônicos, o módulo termoelétrico associado à fonte de corrente desenvolve a função de atuador, enquanto aquela é considerada o drive de potência. A Figura 7b exibe as características funcionais de um bebedouro termoelétrico mostrando o reservatório de água gelada e a fonte de corrente. O reservatório de água gelada consiste em uma cuba isolada ao qual estão associados trocadores de calor, módulo termoelétrico, dutos de alimentação e drenagem de água como em detalhe na Figura 8 e a fonte de corrente representa o drive de potência.

Assim como nos bebedouros com refrigeração mecânica incorporada, em bebedouros com refrigeração termoelétrica o controle de temperatura do reservatório de água gelada é realizado por meio de termostato eletromecânico de bulbo a gás. O capilar do termostato é inserido no interior do reservatório de água gelada em contato térmico com o fluido e o gatilho de acionamento eletromecânico é associado à fonte de corrente.

A variação no volume do gás do termostato comanda o gatilho mecânico que fecha ou abre circuito elétrico de acionamento do módulo TEC. Quando o circuito de gatilho da chave biestável é ativado, o circuito de alimentação do módulo termoelétrico é fechado e

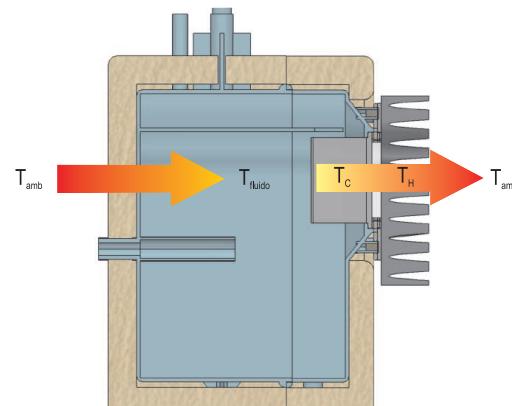
**Figura 8: Reservatório de água refrigerada**



uma corrente elétrica contínua forçada é transmitida ao módulo termoelétrico que absorve calor da água do reservatório pela face fria e dissipa a energia térmica e elétrica pela face quente. Quando o circuito é aberto ocorre o transporte passivo de calor do meio para o reservatório.

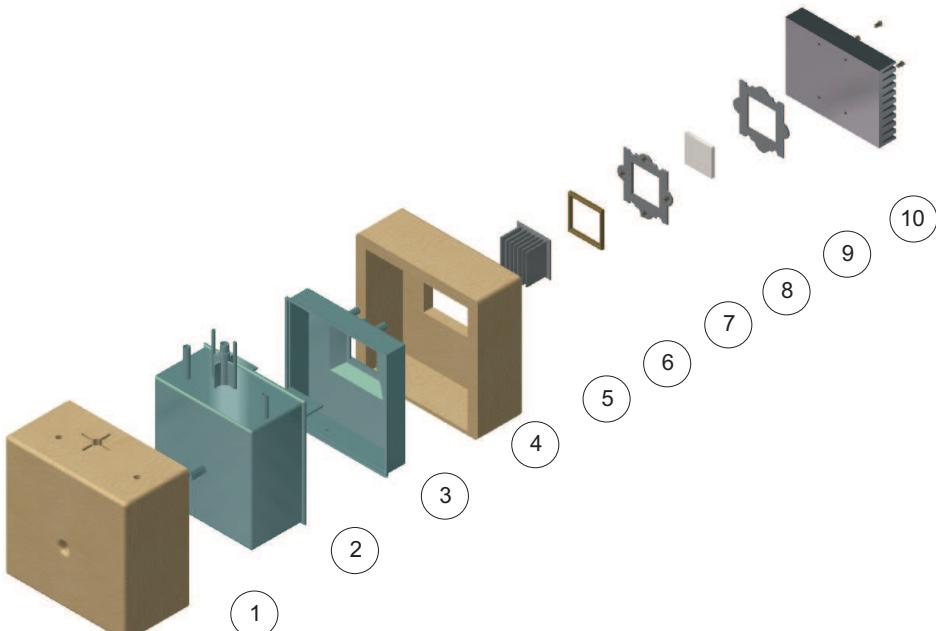
A Figura 9 representa o transporte ativo de energia térmica no reservatório de água gelada quando o TEC é acionado. O calor é transferido do ambiente para a água no reservatório por meio do isolante térmico. O fluido transfere calor para o trocador de calor interno por convecção. A face fria do módulo permanece em contato térmico com a base do trocador interno e transfere o calor de forma ativa da base do mesmo para face quente. A face quente transmite calor para a base do trocador de calor externo que transfere o calor para o meio por convecção tal que  $T_{amb}$  representa a temperatura ambiente,  $T_{fluido}$  a temperatura do fluido a ser refrigerado,  $T_C$  e  $T_H$  representam a temperatura na face fria e quente do módulo termoelétrico, respectivamente. A Figura 10 apresenta um esquemático

**Figura 9: Fluxo de energia térmica no reservatório de água refrigerada**



dos componentes do reservatório refrigerado:

**Figura 10: Componentes do reservatório de água refrigerada**



1 - Isolante Porção Anterior; 2 - Cuba Porção Frontal; 3 - Cuba Porção Posterior;  
 4 - Isolante Porção Posterior; 5 - Trocador de Calor Interno; 6 - Isolamento Térmico;  
 7 - Retentor; 8 - Módulo Peltier; 9 - Manta Térmica; 10 - Trocador de Calor Externo.

## 2.5 PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS

O processo de desenvolvimento de bebedouros eletrônicos está diretamente associado à evolução daqueles com refrigeração mecânica incorporada. O uso de metodologia incremental apoia-se nas estruturas existentes com mudanças progressivas em detrimento às mudanças conceituais - reengenharia.

Na Figura 7b percebe-se que o reservatório de água refrigerada presente na estrutura é legado daquele retratado na Figura 7a. Uma vez que os bebedouros eletrônicos tem compartimento refrigerado próprio, a estrutura é obsoleta e não apresenta função justificável no processo de fornecimento de água gelada, tratando-se apenas de um processo de reaproveitamento de moldes e máquinas ferramentas pré-existentes na fabricação da estrutura do equipamento.

O uso de termostato na regulação da temperatura do reservatório refrigerado em bebedouros termoelétricos é uma alternativa previamente adotada na tecnologia de refrigeração baseada no princípio da compressão. Embora o princípio de refrigeração seja diferente, optou-se pelo uso da mesma estrutura de controle baseada em ciclos biestáveis

aproveitando a experiência já adotada no processo de refrigeração por motocompressores.

A substituição do termostato eletromecânico em bebedouros termoelétricos por sensores e controle alternativos constitui uma oportunidade de explorar as facilidades que os módulos eletrônicos oferecem quanto ao bombeamento de calor e regulação de temperatura conforme intensidade da corrente elétrica drenada ao TEC.

O uso de sensores e controladores eletrônicos na regulação da temperatura do reservatório refrigerado é uma alternativa potencial ao dimensionamento econômico de componentes e uso eficiente de energia elétrica em bebedouros termoelétricos.

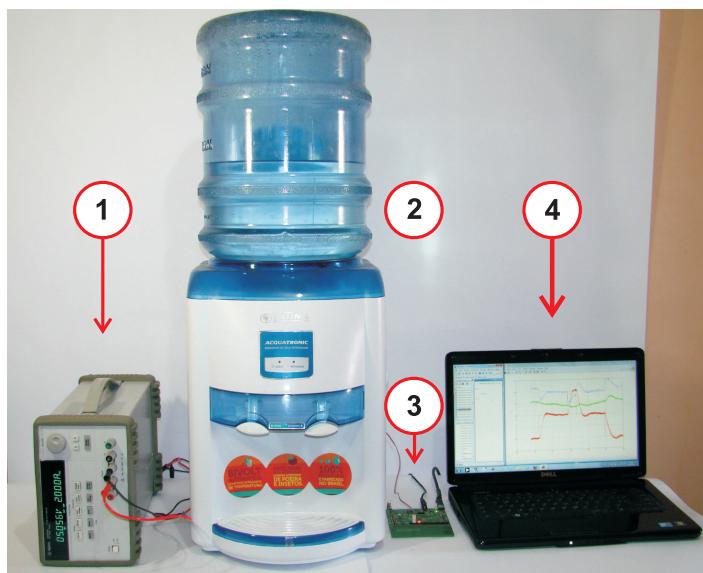
### 3 BANCADA EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da descrição da bancada experimental utilizada para prototipagem da estratégia de Controle Preditivo Baseado em Modelo aplicada a um bebedouro termoelétrico comercial. O capítulo destaca aspectos relacionados à construção, instrumentação, especificação de componentes, integração dos módulos e características do protótipo. É detalhado o uso da bancada para experimentos de identificação e para controle.

#### 3.1 PLATAFORMA DE ENSAIO

O processo em estudo é constituído por sistema de refrigeração termoelétrico, módulo de aquisição de dados, módulo de controle e processamento, módulo de comunicação e drive de potência conforme exibido na Figura 11.

**Figura 11:** Bancada Experimental.



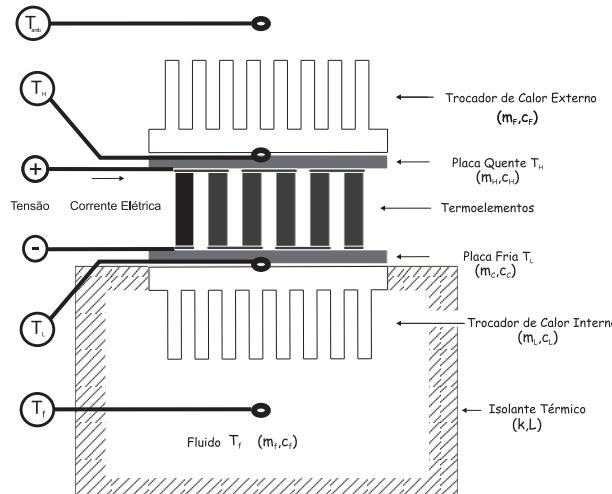
**1 - Drive de Potência; 2 - Sistema de Refrigeração Termoelétrico;  
3 - Módulo de Aquisição de Dados; 4 - Módulo de Controle e Processamento.**

A integração dos módulos permite realizar estudos acerca do desempenho do sistema térmico através da medição de temperaturas e grandezas elétricas quando o mesmo é submetido a corrente elétrica controlada. As condições operacionais podem ser definidas manualmente através da ação de um operador ou automaticamente através da unidade de controle e processamento via software.

### 3.2 MEDIÇÕES

A Figura 12 apresenta um esquemático do refrigerador termoelétrico evidenciando as grandezas medidas e pontos onde são realizadas. O volume de controle consiste em um reservatório de volume interno de aproximadamente  $2L$  envolvido por uma camada de espuma de poliuretano. O volume é permanentemente ocupado por um fluido a ser refrigerado. Um dissipador interno é engastado nas paredes do recipiente. As aletas desse dissipador estão em contato térmico com o fluido, enquanto que a base é associada à face fria do módulo peltier. A base do dissipador externo é acoplada à face quente do módulo e as aletas permanecem em contato com o ar atmosférico. As superfícies de contato entre os dissipadores e módulo são preenchidas por pasta térmica. As operações consideram apenas a polarização direta do TEC, permitindo distinguir a face fria e a face quente.

**Figura 12: Esquemático: Volume de controle.**



O processo de refrigeração consiste no bombeamento de calor do fluido para o ambiente através do módulo termoelétrico quando o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica contínua forçada.

Para o estudo de desempenho do refrigerador monitora-se a temperatura do fluido  $T_f$  e a temperatura ambiente  $T_{amb}$ ; além das grandezas diretamente associadas ao módulo termoelétrico: temperatura na face fria  $T_l$ , temperatura na face quente  $T_h$ , corrente elétrica  $I$  e diferença de potencial elétrico  $V$  entre os bornes do módulo Peltier.

O conjunto de grandezas descrito no parágrafo anterior permite analisar o desempenho da estratégia de Controle Preditivo Baseado em Modelo aplicado à regulação da temperatura da água no reservatório refrigerado considerando as variações na temperatura ambiente, as dinâmicas não modeladas, as condições operacionais do módulo Peltier e cálculo do consumo de energia do refrigerador termoelétrico considerando  $P = V \times I$ .

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

As medidas de temperatura nas faces fria e quente do módulo são realizadas por meio de microtermopares tipo-K e linearizadas por circuito integrado próprio. A temperatura do fluido é monitorada por uma sonda NTC com encapsulamento de aço inoxidável inserida no centro geométrico do recipiente. A temperatura ambiente é medida através de um circuito integrado LM35. Os sinais elétricos análogos são multiplexados por chave e convertidos em dados digitais a serem transmitidos para unidade de processamento e controle. As grandezas elétricas são aferidas e convertidas pelo drive de potência.

#### 3.3.1 Medição da Temperatura na Faces do Módulo Termoelétrico

Para medição das temperaturas nas faces fria e quente do módulo termoelétrico faz-se uso de micro-termopares tipo-K conectados a circuito integrado AD595. O uso dos termopares tipo-K está associado à faixa de trabalho dos mesmos  $[-200, 1200]^\circ\text{C}$  com sensibilidade aproximada de  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  e às dimensões reduzidas que permitem a montagem das juntas entre as superfícies das faces dos módulos e a base dos trocadores de calor interno e externo causando a menor interferência possível na montagem original.

O circuito integrado AD595C consiste em um amplificador de instrumentação monolítico com compensação de temperatura da junta fria embarcado. O sinal de saída corresponde a uma variação de  $10m\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Os sinais de saída dos dois circuitos integrados AD595 associados a cada termopar são conectados ao módulo de aquisição que converte os sinais analógico em digitais e envia as informações via rede de comunicação para módulo de processamento e controle.

#### 3.3.2 Medição da Temperatura no Reservatório de Água Gelada

A medição da temperatura do fluido confinado no reservatório refrigerado é realizada via sonda NTC - Negative Temperature Coefficient - encapsulada em aço inoxidável inserida no centro geométrico do reservatório sem contato direto com o fluido. No caso, trata-se de um termistor comercial com coeficiente de variação de temperatura negativo e resistência de referência  $R_0 = 100K\Omega$  a temperatura de referência  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  e  $\beta = 3990$ . A Equação de Steinhart-Hart descreve a curva característica que relaciona a temperatura absoluta T [K] em função da resistência R [ $\Omega$ ] para o dispositivo aplicado:

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 \ln^2 R + \dots + A_n \ln^n R \quad (1)$$

tal que a ordem do polinômio está relacionada à exatidão requerida para descrição da relação  $R \times T$  e  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$  são os coeficientes relacionados às características dos materiais utilizados na confecção do termistor.

Na prática, os dispositivos NTC são especificados em função do coeficiente de variação da resistência elétrica em relação à temperatura  $\beta$ :

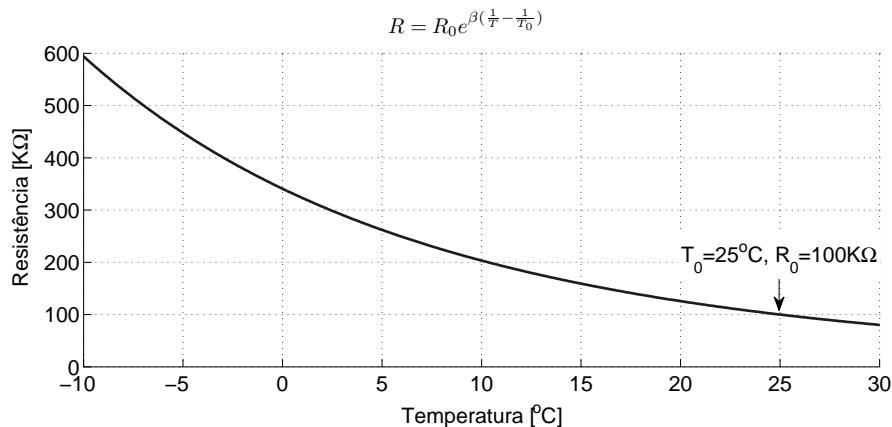
$$\begin{aligned} -\beta \frac{1}{T^2} &= \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \Rightarrow - \int_{T_0}^T \beta \frac{1}{T^2} dT = \int_{R_0}^R \frac{1}{R} dR \\ \Rightarrow R &= R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \end{aligned} \quad (2)$$

dada uma temperatura de referência  $T_0$  e resistência de referência  $R_0$ . A relação não linear entre  $R$  e  $T$  demonstrada na equação (2) pode ser obtida a partir da equação (1) considerando:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{\beta} \ln R_0 \\ A_1 = \frac{1}{\beta} \\ A_2, \dots, A_n = 0 \end{array} \right.$$

A Figura 13 representa a curva típica de um NTC comercial com  $R_0 = 100K\Omega$ ,  $T_0 = 25^\circ C$  e  $\beta = 3990$  segundo a equação (2):

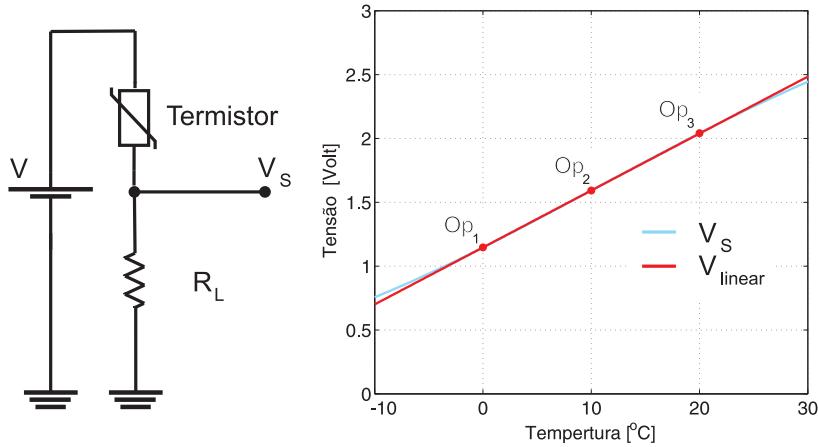
**Figura 13: Curva característica NTC:  $R_0 = 100K$ ,  $T_0 = 25^\circ C$  e  $\beta = 3990$ .**



O gráfico explicita a relação não linear  $R \times T$  e o coeficiente negativo da variação de  $R$  em relação a variação de  $T$ , isto é, o aumento da temperatura implica na diminuição da resistência do termistor.

Para o uso de termistores em sistema de controle realimentado é necessário realizar a linearização do dispositivo para utilizá-lo como transdutor. Uma maneira simples de prover uma medida linear é dispor um resistor em série  $R_L$  conforme esquema de medição exibido na Figura 14:

**Figura 14: Curva característica NTC linearizado: circuito de linearização.**



o valor da tensão de alimentação  $V$  deve ser dimensionado de modo que a corrente que passa pelo termistor não exceda o limite do valor especificado para máxima dissipação interna considerando a maior temperatura a ser atingida pelo sistema. O cálculo da resistência de linearização  $R_L$  é realizado como uma estimativa baseada nos pontos operacionais mínimo  $Op_1$ , médio  $Op_2$  e máximo  $Op_3$  considerando a região de operação do sistema conforme a equação a seguir:

$$R_L = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 - 2 R_1 R_3}{R_1 + R_3 - 2 R_2}$$

tal que  $R_1$  corresponde ao valor da resistência na temperatura mínima de trabalho no ponto operacional  $Op_1$ ,  $R_2$  corresponde ao valor da resistência na temperatura média de trabalho no ponto operacional  $Op_2$ , e,  $R_3$  corresponde ao valor da resistência na temperatura máxima de trabalho no ponto operacional  $Op_3$ . O valor calculado de  $R_L$  é utilizado para especificar resistor comercial baseado na linearização do sínusoide  $V_s$  usando a estimativa a três pontos.

O sinal de saída  $V_s$  é conectado ao módulo de aquisição que converte o sinal analógico em digital e envia a informação via rede de comunicação para módulo de processamento e controle.

### 3.3.3 Medição da Temperatura Ambiente

A medição da temperatura ambiente é realizada por meio do circuito integrado LM35 com sinal de saída de  $10mV/^{\circ}C$  e exatidão de  $\pm 0.5^{\circ}C$  a  $25^{\circ}C$ . O sinal de saída é conectado ao módulo de aquisição que converte o sinal analógico em digital e envia a informação via rede de comunicação para módulo de processamento e controle.

### 3.3.4 Medição da Diferença de Potencial Elétrico no Módulo Termoelétrico

A medição da diferença de potencial elétrico entre os terminais do módulo termoelétrico é realizada pelo drive de potência *Agilent E3632A*. O mesmo converte o sinal analógico e envia informação digital para o módulo de processamento e controle.

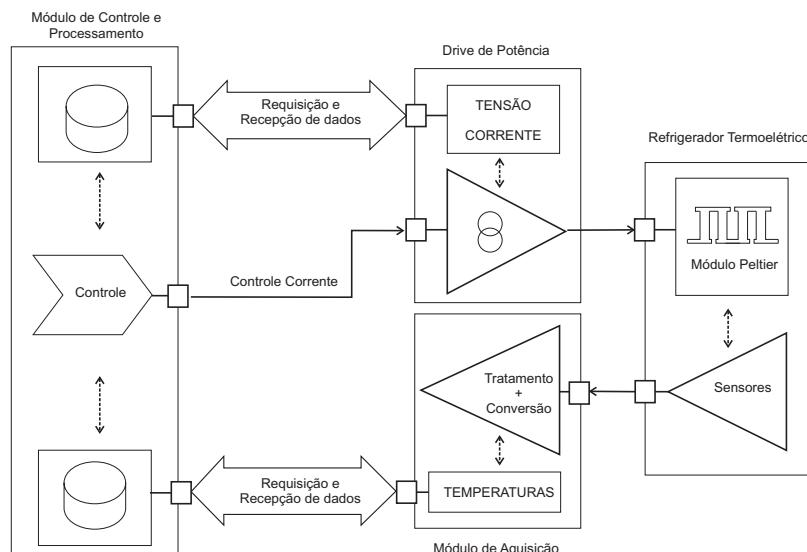
### 3.3.5 Medição da Corrente Elétrica Drenada ao Módulo Termoelétrico

A medição da corrente elétrica drenada pelo drive de potência para o módulo termoelétrico é realizada pelo próprio drive. O sinal analógico é convertido em dado digital e enviado para o módulo de processamento e controle.

## 3.4 INTEGRAÇÃO DO MÓDULOS

A integração entre os módulos é representada na Figura 15:

**Figura 15: Integração de Módulos.**



A comunicação é realizada através do padrão RS-232 e é simbolizada pelas setas e flechas conforme a Figura 15. O módulo de aquisição e o drive funcionam como escravos enquanto que a unidade de processamento e controle gerencia a transmissão através da solicitação de dados e uso das funções do drive de potência. O ciclo de leitura é realizado a cada 10 segundos, período no qual o drive e o módulo de aquisição preparam os dados para envio. A unidade de processamento solicita novamente os dados em caso de falha no recebimento limita o tempo de espera registrando os momentos em que os pacotes são recebidos.

O módulo de controle e processamento gerencia a comunicação e realiza o processamento, armazenamento e apresentação dos dados amostrados. Através de software é possível programar experimentos automáticos para sincronização dos módulos de aquisição e drive de potência. O módulo de controle solicita dados referentes às temperaturas e grandezas elétricas do módulo de aquisição e drive de potência, respectivamente, e programa a corrente elétrica fornecida ao refrigerador segundo sequência pré-estabelecida ou lei de controle implementada via software.

A implementação de uma sequência pré-estabelecida para corrente ou lei de controle alternativa permite ao sistema realizar experimentos de identificação de modelos discretos da planta ou estabelecer estratégias de controle discreto alternativas via software.

O drive de potência consiste em uma fonte de corrente programável que alimenta o módulo termoelétrico apenas em polarização direta e realiza a conversão e comunicação dos dados de tensão e corrente elétrica ao módulo de controle e processamento.

O protótipo substitui o sistema de regulação da temperatura do reservatório baseado no termostato eletromecânico por um sistema de aquisição de dados e controle digitais. A lei de controle é determinada por software e as grandezas medidas são armazenadas em banco de dados para posterior análise crítica de desempenho.

## 4 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO

Neste capítulo é apresentado um modelo dinâmico fenomenológico da planta em estudo. É desenvolvido o experimento de identificação e realizada a parametrização de modelos discretos para o processo limitados à ordem do modelo fenomenológico apresentado. É apresentado um critério para seleção do modelo e um único modelo para o processo é estabelecido para fins de simulação e controle.

### 4.1 OBJETIVOS DA MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO

A modelagem fenomenológica e a identificação de sistemas dinâmicos constituem ferramentas estratégicas para solução de problemas de controle. Sistemas de controle realimentados despontam como alternativas para solução do problema de regulação da temperatura em sistemas termoelétricos.

Nesse caso, a temperatura é a grandeza controlada enquanto que a corrente transmitida ao módulo termoelétrico é a variável de controle. O sucesso do controle automático realimentado é condicionado pela sintonia do controlador. A parametrização do mesmo é dificultada por falta de um modelo para o processo ou pela inviabilidade de realizar a sintonia dos parâmetros baseado em técnicas experimentais [20].

Portanto, a disponibilidade de um modelo para o processo permite a simulação e sintonia de controladores mais sofisticados que os atuais termostatos eletromecânicos comumente aplicados em bebedouros eletrônicos. A aplicação de controladores mais sofisticados, além de solucionar o problema de regulação da temperatura, potencialmente pode realizá-lo com a otimização do consumo de energia elétrica, dimensionamento econômico dos componentes ou adequação a especificações incompatíveis com o modo biestável [21].

Vislumbradas essas potencialidades é que se recorre à modelagem dinâmica e a identificação de parâmetros no intuito de avaliar através de simulações computacionais o comportamento do sistema quando submetido a diversas condições de projeto para posterior análise experimental das mesmas. Os modelos são parametrizados através de técnicas de identificação considerando a estrutura discreta do modelo linearizado desenvolvido.

### 4.2 MODELO DINÂMICO DO PROCESSO

A dinâmica do processo é regida pelo acoplamento térmico e elétrico dos agentes integrantes do sistema: ambiente, isolantes, recipiente, fluido, trocador de calor interno,

módulo peltier e trocador de calor externo. A corrente elétrica define a energia térmica bombeada ativamente pelo módulo a partir da face fria; as propriedades dos materiais e dimensionamento termodinâmico definem a temperatura em cada região de estudo. Para fins de modelagem considera-se que a temperatura em cada elemento do circuito térmico é uniforme e, portanto, realizada a parâmetros concentrados [22].

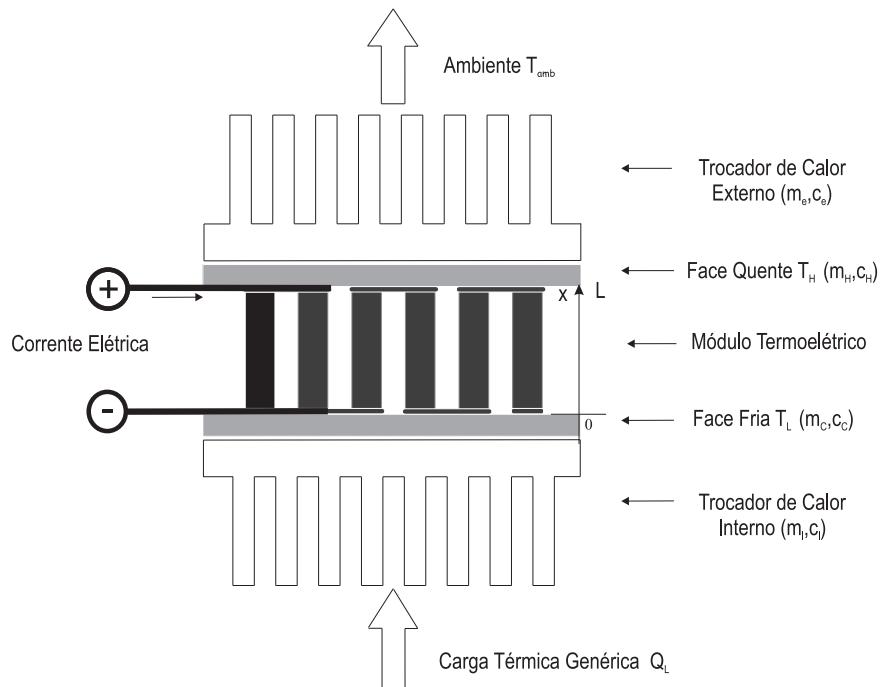
A descrição do modelo fenomenológico considera o balanço de energia no fluido, na face fria e na face quente do módulo termoelétrico, e a dinâmica nos termoelementos. Nesse caso, são definidas as condições de contorno, aproximações e linearização para as equações que descrevem o sistema.

As condições de contorno estabelecem as relações entre calor e temperatura nas fronteiras de cada componente do sistema. As aproximações são considerações simplificadoras que resultam em grande vantagem ao trabalhar as equações. A necessidade de linearização está relacionada com a forte dependência das propriedades físicas dos materiais em relação à temperatura [23].

#### 4.2.1 Equacionamento do Sistema Térmico com Carga Genérica $Q_L$

A Figura 16 representa esquematicamente o refrigerador termoelétrico para fim de descrição do modelo dinâmico do sistema térmico. A carga térmica  $Q_L$  define o calor a ser bombeado pelo módulo termoelétrico de forma genérica:

**Figura 16: Equacionamento do Sistema Térmico: Carga Térmica Genérica  $Q_L$ .**



A equação (1) modela o balanço de energia na face fria do módulo:

$$\begin{aligned} Q_L - Q_k - I\alpha_{pn}T_L &= (m_l c_l + m_c c_c) \frac{dT_L}{dt} \\ Q_k &= -kA \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} \end{aligned} \quad (1)$$

tal que  $Q_k$  representa o calor absorvido por condução na face fria do módulo;  $Q_L$  corresponde a carga térmica genérica que define a energia que flui para superfície fria do módulo termoelétrico;  $I\alpha_{pn}T_L$  é energia absorvida pelo módulo termoelétrico devido Efeito Seebeck;  $T(x,t)$  é a função que define a distribuição unidimensional de temperatura nos termoelementos;  $k$  é a condutibilidade térmica do material termoelétrico;  $A$  é a soma da área transversal dos termoelementos; e,  $m_l$  a massa do trocador de calor interno,  $c_l$  o calor específico do trocador de calor interno,  $m_c$  a massa dos termoelementos associados à face fria do módulo termoelétrico e  $c_c$  calor específico dos termoelementos associados à face fria do módulo termoelétrico.

A equação (2) modela o balanço de energia no trocador de calor externo tal que  $I\alpha_{pn}T_H$  corresponde a energia dissipada na face quente pelo módulo termoelétrico devido Efeito Seebeck;  $Q_o$  representa a energia térmica conduzida na superfície quente dos termoelementos;  $Q_c$  é o calor transmitido por convecção para o ambiente;  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente;  $h$  coeficiente de convecção do dissipador;  $A_F$  a área efetiva de convecção; e,  $m_e$  a massa do trocador de calor externo,  $c_e$  o calor específico do trocador de calor externo,  $m_H$  a massa dos termoelementos associados à face quente do módulo termoelétrico e  $c_H$  o calor específicos dos termoelementos associados à face quente do módulo termoelétrico:

$$\begin{aligned} I\alpha_{pn}T_H + Q_o - Q_c &= (m_e c_e + m_H c_H) \frac{dT_H}{dt} \\ Q_c &= h A_F (T_H - T_{amb}); Q_o = -kA \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} \end{aligned} \quad (2)$$

O fluxo de energia nos termoelementos é descrito pela Equação de Fourier (3):

$$k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\tau}{A} I \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\rho}{A^2} I^2 = AC\gamma \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

onde as condições de contorno para as temperaturas nas extremidades fria e quente do módulo peltier são dadas por  $T(0,t) = T_L(t)$  e  $T(L,t) = T_H(t)$ , respectivamente. O balanço energético apresentado na equação (3) deve-se a ação respectiva dos efeitos Peltier, Thomson e Joule. Tal que  $\tau$  é o coeficiente Thomson;  $\rho$  a resistividade elétrica média;  $C$  o calor específico; e  $\gamma$  a massa específica dos materiais que compõem os termoelementos.

Portanto, as equações que modelam a dinâmica do conjunto termoelétrico consideram o fluxo de calor através das massas acopladas ao módulo e massa dos termoelementos. O apelo a linearização do sistema deve-se a forte influência da temperatura nas propriedades físicas dos materiais e a aplicação de técnicas lineares para a sintonia de controladores.

#### 4.2.2 Linearização do Modelo

Devido a influência direta da temperatura sobre as propriedades físicas do sistema, as equações (1), (2) e (3) devem ser linearizadas. Realiza-se a linearização baseada na análise de pequenos sinais. O método considera as grandezas apresentadas no modelo como o resultado da soma do valor em regime permanente a uma pequena perturbação em torno do mesmo. Portanto, as grandezas passam a ser representadas conforme o sistema de equações (4):

$$\begin{cases} T(x,t) = \bar{T}(x) + \tilde{T}(x,t); & Q_L(t) = \bar{Q}_L + \tilde{Q}_L(t); \\ T_H(t) = \bar{T}_H + \tilde{T}_H(t); & T_L(t) = \bar{T}_L + \tilde{T}_L(t); \\ T_{amb}(t) = \bar{T}_{amb} + \tilde{T}_{amb}(t); & I(t) = \bar{I} + \tilde{I}(t); \end{cases} \quad (4)$$

aproximando o coeficiente Seebeck por Série de Taylor:

$$\begin{cases} \alpha_{pn}(T) = \alpha_L + \frac{\tau}{\bar{T}_L} \tilde{T}_L \\ \alpha_{np}(T) = \alpha_H + \frac{\tau}{\bar{T}_H} \tilde{T}_H \end{cases}$$

tal que  $\alpha_L = \alpha_{pn}(\bar{T}_L)$  e  $\alpha_H = \alpha_{np}(\bar{T}_H)$ .

Considerando as propriedades  $\tau$ ,  $k$ ,  $\rho$ ,  $C$  e  $\gamma$  constantes em regime permanente; substituindo as equações descritas em (4) nas equações de fluxo de calor; e, desprezando os termos de ordem elevada e constantes:

$$\begin{cases} \tilde{Q}_L(t) - (\alpha_L + \tau) \bar{I} \tilde{T}_L(t) - \alpha_L \bar{T}_L \tilde{I}(t) + kA \frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = (m_l c_l + m_c c_c) \frac{d \tilde{T}_L(t)}{dt} \\ (\alpha_H + \tau) \bar{I} \tilde{T}_H(t) + \alpha_H \bar{T}_H \tilde{I}(t) - kA \frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} - h A_F (\tilde{T}_H - \tilde{T}_{amb}) = (m_e c_e + m_H c_H) \frac{d \tilde{T}_H(t)}{dt} \\ k \frac{\partial^2 \tilde{T}(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\tau \bar{I}}{A} \frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial x} + \left( \frac{2\rho \bar{I}}{A^2} - \frac{\tau(\bar{T}_H - \bar{T}_L)}{AL} \right) \tilde{I}(t) = C \gamma \frac{\partial \tilde{T}(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

as condições de contorno são  $\tilde{T}(0,t) = \tilde{T}_L(t)$ ,  $\tilde{T}(L,t) = \tilde{T}_H(t)$  e  $\frac{d \tilde{T}(x)}{dx} \approx (\bar{T}_H - \bar{T}_L)/L$ . Assu-

mindo que o calor trocado devido ao efeito Thomson é desprezível, aplica-se a Transformada de Laplace ao sistema de equações (5) para solução da Equação de Fourier:

$$\tilde{T}(x, s) = \frac{-\frac{\tilde{I}(s)\beta}{C\gamma s} [\sinh \lambda x - \sinh \lambda(x-L)] + \tilde{T}_H(s) \sinh \lambda x}{\sinh \lambda L} - \frac{\tilde{T}_L(s) \sinh \lambda(x-L)}{\sinh \lambda L} \sinh \lambda L + \frac{\tilde{I}(s)\beta}{2C\gamma s \sinh \lambda L} \quad (6)$$

tal que:

$$\lambda(s) = \sqrt{\frac{C\gamma s}{k}}, \quad \beta = \frac{2\rho\bar{I}}{A^2}, \quad \alpha = \alpha_H = \alpha_L$$

Substituindo  $\frac{\partial \tilde{T}(x, s)}{\partial x} \Big|_{x=0}$  e  $\frac{\partial \tilde{T}(x, s)}{\partial x} \Big|_{x=L}$  em (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{Q}_L(s) - \alpha \bar{I} \tilde{T}_L(s) - \alpha \bar{T}_L \tilde{I}(s) + kA \frac{\lambda}{\sinh \lambda L} \left[ \frac{\tilde{I}(s)\beta}{C\gamma s} [\cosh \lambda L - 1] + (\tilde{T}_H(s) - \tilde{T}_L(s) \cosh \lambda L) \right] = (m_l c_l + m_c c_c) s \tilde{T}_L(s) \\ \alpha \bar{I} \tilde{T}_H(s) + \alpha_H \bar{T}_H \tilde{I}(s) - kA \frac{\lambda}{\sinh \lambda L} \left[ \frac{\tilde{I}(s)\beta}{C\gamma s} [1 - \cosh \lambda L] + (\tilde{T}_H(s) \cosh \lambda L - \tilde{T}_L(s)) \right] - h A_F (\tilde{T}_H(s) - \tilde{T}_{amb}(s)) = (m_e c_e + m_H c_H) s \tilde{T}_H(s) \end{array} \right. \quad (7)$$

Nesse caso, as equações apresentadas em (7) são de ordem indeterminada, logo é necessário realizar aproximações para que o sistema obtido seja de ordem limitada e preferencialmente reduzida.

#### 4.2.3 Função de Transferência do Processo

Aproximando as funções hiperbólicas por Séries de Taylor:

$$\sinh \lambda L \approx \lambda L, \quad \cosh \lambda L \approx 1 + \lambda^2 L^2 / 2 \quad (8)$$

o sistema de equações (7) é reescrito:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{Q}_L(s) - \alpha \bar{I} \tilde{T}_L(s) - \alpha \bar{T}_L \tilde{I}(s) + \tilde{I}(s) \frac{\rho L}{A} \bar{I} + \frac{kA}{L} \tilde{T}_H(s) - \frac{kA}{L} \tilde{T}_L(s) \left( 1 + \frac{C\gamma s L^2}{2k} \right) = (m_l c_l + m_c c_c) s \tilde{T}_L(s) \\ \alpha \bar{I} \tilde{T}_H(s) + \alpha_H \bar{T}_H \tilde{I}(s) + \tilde{I}(s) \frac{\rho L}{A} \bar{I} - \frac{kA}{L} \tilde{T}_H(s) \left( 1 + \frac{C\gamma s L^2}{2k} \right) - h A_F (\tilde{T}_H(s) - \tilde{T}_{amb}(s)) = (m_e c_e + m_H c_H) s \tilde{T}_H(s) \end{array} \right. \quad (9)$$

Isolando  $\tilde{T}_H(s)$  na segunda equação do sistema de equações (9) e substituindo o resultado é possível escrever  $\tilde{T}_L(s)$  em função de  $\tilde{Q}_L(s)$ ,  $\tilde{T}_{amb}(s)$  e  $\tilde{I}(s)$ :

$$\tilde{T}_L(s) = \frac{C_{hot}s - \alpha\bar{I} + kA/L + hA_f}{\left\{ [C_{cold}s + \alpha\bar{I} + kA/L][C_{hot}s - \alpha\bar{I}] + kA/L + hA_f \right\} - (kA/L)^2} \tilde{Q}_L(s) + \quad (10)$$

$$+ \frac{\left\{ \begin{array}{l} (-\alpha\bar{T}_L + \bar{I}\rho\frac{L}{A})[C_{hot}s - \alpha\bar{I}] \\ + \frac{kA}{L} + hA_f \end{array} \right\} + kA/L(\alpha\bar{T}_H + \bar{I}\rho\frac{L}{A})}{\left\{ \begin{array}{l} [C_{cold}s + \alpha\bar{I} + kA/L][C_{hot}s - \alpha\bar{I}] \\ + kA/L + hA_f \end{array} \right\} - (kA/L)^2} \tilde{I}(s) + \quad (11)$$

$$+ \frac{kAhA_f/L}{\left\{ \begin{array}{l} [C_{cold}s + \alpha\bar{I} + kA/L][C_{hot}s - \alpha\bar{I}] \\ + kA/L + hA_f \end{array} \right\} - (kA/L)^2} \tilde{T}_{amb}(s) \quad (12)$$

(13)

(14)

tal que:

$$\begin{cases} C_{cold} &= ALC\gamma/2 + m_c c_c + m_l c_l \\ C_{hot} &= ALC\gamma/2 + m_e c_e + m_h c_h \end{cases}$$

Portanto, as funções de transferência de  $\tilde{Q}_L(s)$ ,  $\tilde{T}_{amb}(s)$  e  $\tilde{I}(s)$  para  $\tilde{T}_L(s)$  são descritas através de modelos de segunda ordem, de forma que os zeros são distintos para cada variável de entrada. Em síntese,  $\tilde{T}_L(s)$  é representada por:

$$\tilde{T}_L(s) = G_{\tilde{Q}_L} \tilde{Q}_L(s) + G_{\tilde{I}} \tilde{I}(s) + G_{\tilde{T}_{amb}} \tilde{T}_{amb}(s) \quad (15)$$

tal que a ordem dos modelos obtidos está associada aos componentes acumuladores de energia envolvidos na modelagem representados por suas respectivas capacidades térmicas dadas pela associação entre a massa do trocador de calor interno, face fria do módulo e termoelementos associados  $C_{cold}$ ; e, pela associação entre a massa do trocador de calor externo, face quente do módulo e termoelementos associados  $C_{hot}$ .

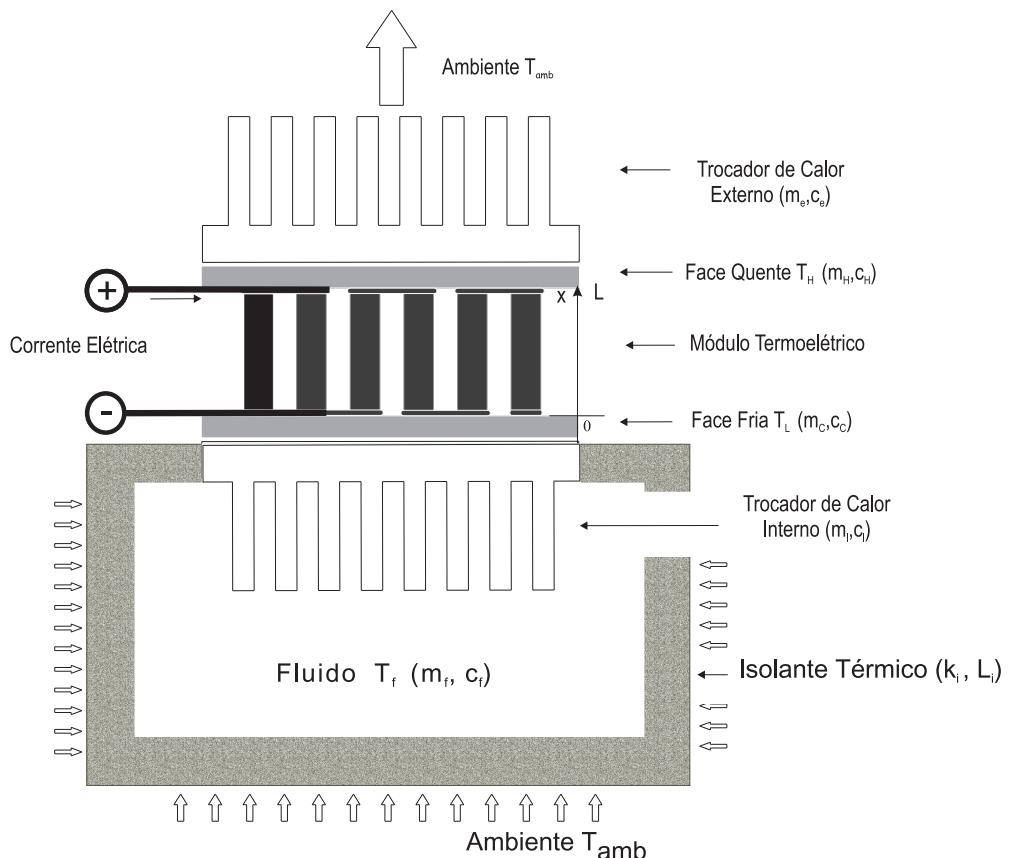
#### 4.2.4 Modelo para Sistema de Refrigeração Termoelétrico

O modelo representado na Figura 16 é modificado com o intuito de modelar o comportamento dinâmico do sistema de refrigeração termoelétrico. Nesse caso,  $\tilde{Q}_L$ , que representa o fluxo de calor para face fria do módulo de forma genérica na equação (1), é substituído pelo efeito convectivo segundo o qual o fluido troca calor com o módulo peltier conforme esquematizado na Figura 17:

$$Q_L = h_{dint} A_{dint} (T_f - T_L)$$

tal que  $h_{dint}$  corresponde ao coeficiente de convecção entre o fluido e o trocador de calor interno;  $A_{dint}$  corresponde a área efetiva para convecção no trocador de calor interno; e,  $T_f$  a temperatura do fluido. Considera-se a análise com capacidade concentrada do fluido; a massa acoplada à superfície fria é interpretada como trocador de calor interno.

**Figura 17: Equacionamento do Sistema Térmico: Efeito Convectivo Fluido.**



A bomba de calor retira energia do fluido através do dissipador interno por meio da convecção, sendo assim, a temperatura no interior do recipiente é sempre menor ou igual à temperatura externa; é desprezado o ganho de energia por radiação; não é considerado o regime transitório do material isolante; e, não ocorre mudança de fase no fluido durante o processo de refrigeração.

A equação (16) modela o balanço energético no fluido conforme o princípio da conservação da energia. O fluxo de energia que entra no sistema  $\dot{Q}_{\text{entrada}}$  é associado a condução do calor do ambiente para o fluido através do isolante; não há geração interna de calor  $\dot{Q}_{\text{gerado}}$  no modelo adotado; o calor transmitido  $\dot{Q}_{\text{saída}}$  é a energia transmitida ao dissipador interno acoplado ao módulo peltier; e, o a energia acumulada  $\dot{Q}_{\text{acumulada}}$  é o calor sensível necessário para alterar a temperatura do fluido confinado. Para o volume de controle a parâmetros concentrados:

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{Q}_{\text{gerado}} - \dot{Q}_{\text{saída}} = \dot{Q}_{\text{acumulada}} \quad (16)$$

$$\frac{T_{\text{amb}}(t) - T_f(t)}{R_{eq}} - h_{dint}A_{dint}(T_f(t) - T_L(t)) = m_f c_f \frac{dT_f(t)}{dt} \quad (17)$$

tal que:

$$R_{eq} = \frac{1}{h_{amb}A_{amb}} + \frac{L}{\kappa \left( \frac{A_{amb} + A_{int}}{2} \right)} + \frac{1}{h_{int}A_{int}}$$

representa a resistência térmica equivalente na interação entre o ambiente e o fluido.

Aplicando a Transformada de Laplace e reescrevendo a equação (17) em termos de perturbações em torno do regime permanente:

$$\frac{\tilde{T}_{\text{amb}}(s) - \tilde{T}_f(s)}{R_{eq}} - h_{dint}A_{dint}(\tilde{T}_f(s) - \tilde{T}_L(s)) = m_f c_f \tilde{T}_f(s) \quad (18)$$

Substituindo  $\tilde{Q}_L(s)$  na equação (15) e isolando  $\tilde{T}_L(s)$ :

$$\tilde{T}_L(s) = \frac{G_{\tilde{Q}_L} h_{dint} A_{dint} \tilde{T}_f(s) + G_{\tilde{T}_{amb}} \tilde{T}_{amb}(s) + G_{\tilde{I}} \tilde{I}(s)}{1 + G_{\tilde{Q}_L} h_{dint} A_{dint}} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18) e isolando  $\tilde{T}_f(s)$ :

$$\begin{aligned} \tilde{T}_f(s) = & \frac{h_i A_i \left\{ \begin{array}{l} (-\alpha \bar{T}_L + \bar{I} \rho \frac{L}{A}) [C_{hot}s - \alpha \bar{I}] \\ + \frac{kA}{L} + hA_f \end{array} \right\} + kA/L(\alpha \bar{T}_H + \bar{I} \rho \frac{L}{A})}{\left\{ \begin{array}{l} [C_{cold}s + \alpha \bar{I} + kA/L] [C_{hot}s - \alpha \bar{I} + \\ + kA/L + hA_f] - (kA/L)^2 \end{array} \right\} (C_f s + \frac{1}{R_{eq}} + h_i A_i) +} \tilde{I}(s) + \\ & \left\{ \begin{array}{l} + h_i A_i \left\{ \begin{array}{l} (-\alpha \bar{T}_L + \bar{I} \rho \frac{L}{A}) [C_{hot}s - \alpha \bar{I} + kA/L + hA_f] \\ + kA/L(\alpha \bar{T}_H + \bar{I} \rho \frac{L}{A}) \end{array} \right\} (C_f s + \frac{1}{R_{eq}}) \end{array} \right\} \\ & + \left\{ \begin{array}{l} [M_{cold}s + \alpha \bar{I} + kA/L] [C_{hot}s] \\ - \alpha \bar{I} + \frac{kA}{L} + hA_f - (kA/L)^2 \end{array} \right\} + h_i A_i \left\{ \begin{array}{l} [C_{hot}s - \alpha \bar{I} + \frac{kA}{L} + hA_f] \\ + R_{eq} hA_f \frac{kA}{L} \end{array} \right\} \tilde{T}_{amb}(s) \\ & R_{eq} \left\{ \begin{array}{l} [C_{cold}s + \alpha \bar{I} + kA/L] [C_{hot}s - \alpha \bar{I} + \\ + kA/L + hA_f] - (kA/L)^2 \end{array} \right\} (C_f s + \frac{1}{R_{eq}} + h_i A_i) + \\ & + h_i A_i \left\{ \begin{array}{l} (-\alpha \bar{T}_L + \bar{I} \rho \frac{L}{A}) [C_{hot}s - \alpha \bar{I} + kA/L + hA_f] \\ + kA/L(\alpha \bar{T}_H + \bar{I} \rho \frac{L}{A}) \end{array} \right\} (C_f s + \frac{1}{R_{eq}}) \end{aligned} \quad (20)$$

A função de transferência apresentada na equação (20) modela o comportamento dinâmico do sistema de refrigeração termoelétrico como um sistema de terceira ordem com duas entradas  $\tilde{I}$  e  $\tilde{T}_{amb}$ . O fato de adicionar ao sistema representado na equação (10) um novo elemento acumulador de energia - o fluido - amplia a ordem do mesmo.

Considerando-se que a variação da temperatura ambiente é mínima e que o isolamento térmico atenua fortemente interação entre a temperatura do ambiente e o fluido, pode-se afirmar que a segunda parcela da equação (20) contribui pouco para variação da temperatura do fluido. Isto é, pode-se assumir a temperatura ambiente como uma perturbação ao modelo, portanto o modelo pode ser escrito como:

$$\tilde{T}_f(s)/\tilde{I}(s) = H(s) \quad (21)$$

A obtenção do modelo de  $H(s)$  baseado em uma plataforma pré-dimensionada chama à atenção para algumas possibilidades de simplificação além daquela feita no parágrafo anterior. O fato de tratar-se de um sistema de terceira ordem está relacionado com as capacidades térmicas dos dois trocadores de calor e do fluido a ser refrigerado, além da pequena contribuição dos termoelementos associadas igualmente a cada trocador. Neste caso, a capacidade térmica relacionada ao fluido gera um pólo na equação (20), enquanto que os dois outros pólos são representações das capacidades térmicas dos trocadores de calor interno e externo.

Considerando que o fluido confinado tem alta capacidade térmica em relação aos trocadores interno e externo, pode-se caracterizar o sistema através de um único modo dominante, consequência da diferença entre a ordem de grandeza das capacidades térmicas do fluido e trocadores de calor. Assim, o dimensionamento da plataforma experimental e o projeto de experimento de identificação pode levar a uma parametrização de modelos de ordem menor em relação àquela descrita na função de transferência (21) da corrente elétrica  $\tilde{I}(s)$  para temperatura do fluido  $\tilde{T}_f(s)$ .

#### 4.3 IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO DO PROCESSO

O modelo desenvolvido conforme a equação (20) permite familiarizar-se com as variáveis do processo e conhecer a maneira como os parâmetros interagem no sistema. Embora o modelo obtido relate os principais parâmetros é necessário validar experimentalmente as condições de contorno, considerações e simplificações realizadas. Devido à dependência dos parâmetros com respeito à temperatura média do módulo e não disponibilidade dos mesmos para consulta, utiliza-se técnicas de identificação de sistemas no intuito de disponibilizar um modelo paramétrico que simule a evolução temporal da temperatura do fluido mediante a aplicação de níveis de corrente contínua considerando uma região de operação especificada [24].

O experimento de identificação consiste na perturbação do nível de corrente elétrica  $\tilde{I}_o$  fornecida ao sistema quando o mesmo atinge regime permanente e análise da variação da temperatura do fluido  $\tilde{T}_f$  no interior do reservatório. Desse modo, admite-se que a evolução temporal da temperatura do fluido no interior do recipiente  $\tilde{T}_f(t)$  pode ser descrita pelo modelo ARMAX - auto regressivo com média móvel e entrada exógena - conforme a equação discreta (22) com período de amostragem  $T_s$ , tal que  $e(t)$  representa um ruído branco. Nesse caso  $a_k(\tilde{I}_o)$  e  $b_k(\tilde{I}_o)$  são os parâmetros do modelo em função da corrente em regime permanente  $\tilde{I}_o$  e a corrente de excitação representada por  $\tilde{I}_o$  é a entrada exógena:

$$\tilde{T}_f(t) = - \sum_{k=1}^m \underbrace{a_k(\tilde{I}_o)\tilde{T}_f(t-kT_s)}_{\text{Auto-Regressivo}} + \sum_{k=1}^n \underbrace{b_k(\tilde{I}_o)}_{\text{Média Móvel}} \underbrace{\tilde{I}_o(t-kT_s)}_{\text{Entrada Exógena}} + \underbrace{e(t)}_{\text{Ruído Branco}} \quad (22)$$

Os coeficientes  $a_k$  e  $b_k$  dependem fortemente da corrente de polarização aplicada. Portanto, o modelo identificado descreve o comportamento do sistema apenas em torno da corrente especificada  $\tilde{I}_o$  e, consequentemente, da temperatura do fluido em regime

permanente  $\bar{T}_f$ , uma vez que há relação direta entre a temperatura do fluido em regime permanente  $\bar{T}_f$  e a corrente de polarização  $\bar{I}_o$ . Nesse caso, a parametrização requer experimento de identificação em torno das condições operacionais permitidas pela plataforma e a descrição de um polinômio interpolador que relacione os coeficientes com a corrente aplicada [17].

Por outro lado, por tratar-se de refrigerador termoelettrico que compõe um bebedouro, a norma brasileira NBR 13972 que especifica os requisitos de qualidade, desempenho e instalação para bebedouros com refrigeração mecânica incorporada descreve que a temperatura da água deve permanecer em torno de  $10^\circ\text{C}$ . Logo, considerando a temperatura ambiente  $\bar{T}_{amb} = 27,50^\circ\text{C}$ , o experimento de identificação é realizado perturbando-se a corrente do sistema em  $\pm 0,75\text{A}$  em torno da corrente de polarização  $\bar{I}_0 = 1,00\text{A}$  que corresponde à temperatura especificada na norma mantendo a temperatura ambiente ( $\tilde{T}_{amb} = \pm 0,25^\circ\text{C}$ ) controlada por meio de termostato.

#### 4.3.1 Estrutura do Modelo e Erro de Predição

O modelo linear apresentado na equação (21) da sessão anterior é utilizado como base para a seleção da ordem do modelo discreto a ser adotado no processo de identificação. Logo, as constantes  $m$  e  $n$  apresentadas em (22) definem a ordem do modelo discreto e ficam limitadas a ordem do modelo contínuo desenvolvido na equação (20). Nesse caso a partir da equação (22) é possível estabelecer um preditor linear de um passo a frente:

$$\tilde{T}_f(t|t-1, \theta(\bar{I}_o)) = \phi(t-1)^T \theta(\bar{I}_o) + e(t) \quad (23)$$

tal que  $\phi(t-1) = [-\tilde{T}_f(t-1) \dots -\tilde{T}_f(t-m) \quad \bar{I}_o(t-1) \dots \bar{I}_o(t-n)]$  representa o vetor de regressores e  $\theta(\bar{I}_o) = [a_1 \dots a_m \quad b_1 \dots b_n]$  é o vetor de parâmetros associados a  $\bar{I}_o$  quando  $T_s = 1$ . Desse modo, o modelo limita-se a caracterizar o comportamento do sistema apenas quando o mesmo é percorrido por correntes em torno de  $\bar{I}_o$ , e portanto, quando a temperatura do fluido permanece em torno de  $\bar{T}_f$ .

Para fins de identificação de parâmetros define-se o erro de predição  $\varepsilon(t)$  como sendo a diferença entre o valor experimental  $T_{exp}(t)$  no instante  $t$  e o valor obtido por meio da predição um passo a frente  $\tilde{T}_f(t|t-1, \theta(\bar{I}_o))$ , ou seja:

$$\varepsilon(t, \theta) = T_{exp}(t) - \tilde{T}_f(t|t-1, \theta(\bar{I}_o)) \quad (24)$$

Definidos a estrutura ARMAX do modelo segundo a equação (22), a ordem máxima do modelo discreto baseada no valor da ordem do modelo contínuo desenvolvido na equa-

ção (21) e o erro de predição  $\varepsilon(t)$ , é destacada a função de custo  $J_{id}$  conforme equação (25) que utiliza o erro quadrático de predição ao tentar explicar o valor experimental pelo cálculo realizado a partir do preditor de um passo a frente baseado em  $N$  amostras obtidas experimentalmente:

$$J_{id} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} [T_{exp}(t) - \tilde{T}_f(t|t-1, \theta(\bar{I}_o))]^2 \quad (25)$$

O vetor de parâmetros  $\theta(\bar{I}_o)$  é determinado pela minimização de  $J_{id}$  conforme critério de minimização do erro quadrático:

$$\theta(\bar{I}_o) = \arg \min_{\theta(\bar{I}_o) \in \mathcal{D}} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} [T_{exp}(t) - \tilde{T}_f(t|t-1, \theta(\bar{I}_o))]^2 = \arg \min_{\theta(\bar{I}_o) \in \mathcal{D}} J_{id} \quad (26)$$

tal que  $\mathcal{D}$  delimita o espaço de busca do vetor de parâmetros e tem dimensão  $m+n$ . A solução da equação (26) é dada por:

$$\theta(\bar{I}_o) = \underbrace{\left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t-1) \varphi(t-1)^T \right]^{-1}}_{pseudo-inversa} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t-1) T_{exp}(t) \quad (27)$$

#### 4.3.2 Experimento de Identificação

O experimento de identificação consiste na aplicação de um sinal de corrente binário pseudo-aleatório  $i(t)$  adicionado à corrente de polarização  $\bar{I}_o = 1,00A$  na condição operacional estabelecida por norma, ou seja,  $\bar{T}_f = 10^\circ C$ . Assim, representando o modelo da equação (21) como um sistema de terceira ordem com um zero:

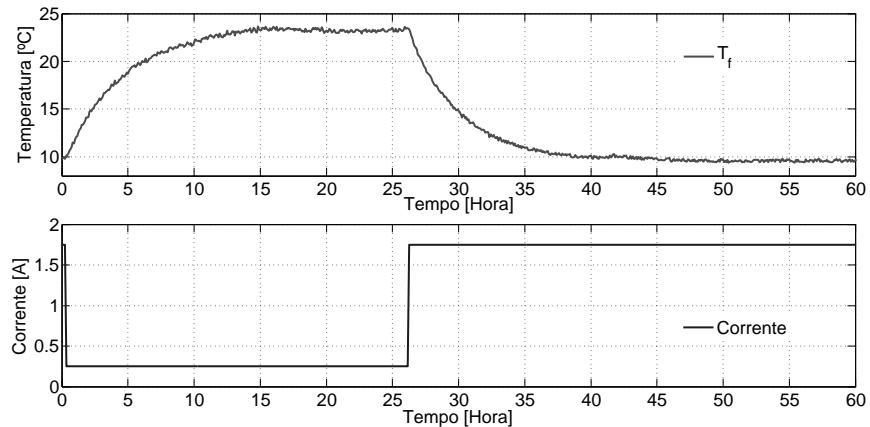
$$\mathcal{H}(s) = K \frac{(s+z_1)}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)} \quad (28)$$

conforme a equação (28) são cinco os parâmetros a serem definidos:  $K$ ,  $z_1$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ . Portanto, uma sequência binária pseudo-aleatória (PRBS) com ordem  $\eta$  superior a 5 é adequada para estimativa dos parâmetros [25].

Os valores máximo e mínimo do sinal binário de corrente, o intervalo entre amostras e período do sinal PRBS são definidas através das limitações operacionais e da resposta ao degrau do sistema para composição de  $i(t)$  em torno da corrente de polarização  $\bar{I}_o$ . Experimentalmente, as temperaturas mínima e máxima alcançadas em um ambiente a  $27,5^\circ C$  são  $10^\circ C$  e  $23,50^\circ C$ , atingidas com correntes de  $1,75A$  e  $0,25A$ , respectivamente. Os limites de corrente definem a amplitude de  $i(t)$  em  $\pm 0,75A$  em torno da corrente de

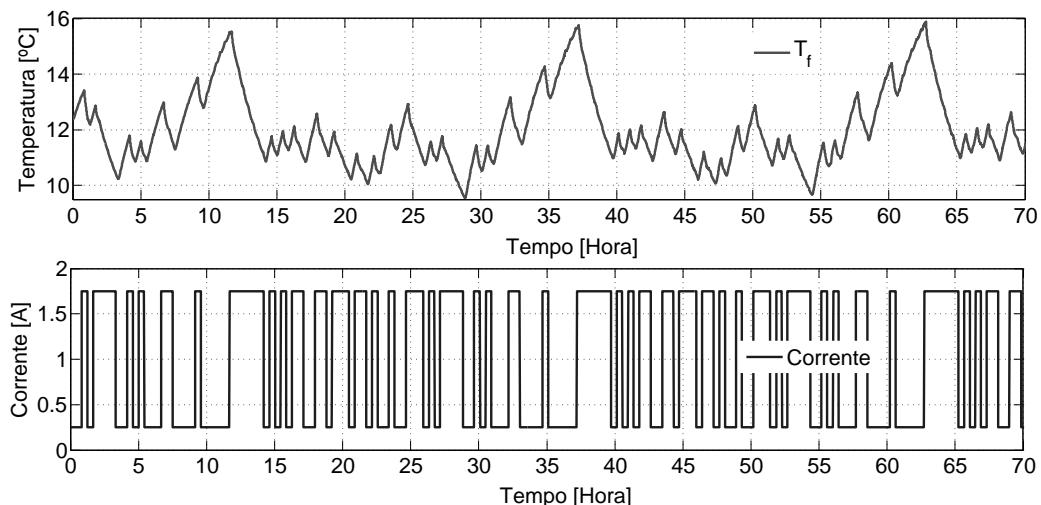
polarização  $\bar{I}_o = 1,00A$ . A Figura 18 exibe a resposta do sistema a excitações em degrau de corrente.

**Figura 18: Resposta ao Degrau de Corrente: Limites Operacionais.**



Aproximando o sistema por um equivalente de primeira ordem, nota-se que em regime transitório o sistema atinge 63% do valor final de regime permanente em 4,20 horas e possui tempo de acomodação de 20 horas segundo critério de  $\pm 2\%$  em torno do valor de regime permanente. Segundo [26] o período do PRBS deve ser maior que o tempo de acomodação do sistema, e o intervalo entre amostras  $T_b$  deve ser maior que um décimo da constante de tempo mínima do sistema e menor que um terço da mesma. Portanto, considerando a menor constante de tempo como a terça parte daquela apresentada no modelo de primeira ordem, fazendo  $T_b = 25$  minutos e  $\eta = 6$  então o período do sinal de excitação é de  $T_{i(t)} = (2^\eta - 1)T_b = 26,25$  horas. A resposta do sistema a três períodos do sinal de excitação é apresentada na Figura 19.

**Figura 19: Resposta do Sistema e Excitação PRBS.**



Os sinais de entrada e saída devem ser trabalhados considerando períodos completos para manutenção das propriedades estatísticas do sinal pseudo-aleatório [26]. Nesse caso, a média de temperatura da resposta à excitação é correspondente à temperatura em regime permanente, assim como a média da corrente. Logo, é possível estabelecer experimentos designando a corrente de polarização e excursão do sinal segundo os limites operacionais.

#### 4.3.3 Critérios para Estimação de Parâmetros

Representando o modelo descrito na equação (22) através de uma função de transferência discreta em função da corrente de polarização:

$$\tilde{H}(z, \bar{I}_o) = \frac{b_1(\bar{I}_o)z^{-1} + \dots + b_n(\bar{I}_o)z^{-n}}{1 + a_1(\bar{I}_o)z^{-1} + \dots + a_m(\bar{I}_o)z^{-m}} \quad (29)$$

sabendo-se que o sistema é causal e, dado conhecimento sobre a ordem máxima requerida para fins de modelagem, é realizada a identificação de parâmetros tal que  $1 \leq m, n \leq 3$  e  $m \geq n$ . O espaço de busca para ordem dos regressores é investigado em razão da não equiparidade direta entre a quantidades de polos e zeros em modelos contínuos e discretos [27]. A estimativa considera metade dos dados experimentais disponíveis  $N/2$ , enquanto que a segunda metade  $N/2$  é utilizada para validação dos modelos obtidos.

Para fins de quantificação da relação ordem do modelo e variância do resíduo utiliza-se a Função de Erro de Predição Final de Akaike (*FPE: Akaike's Final Prediction Error*). A métrica relaciona a precisão do modelo segundo um conjunto de dados de validação geralmente distintos daqueles utilizados para identificação, tal que o modelo que apresentar menor índice corresponde ao mais adequado baseado na correlação do erro cometido ao explicar os dados experimentais pela simulação do modelo. Para isso avalia-se a função de perda  $V$ , o número de parâmetros estimados  $\rho = m + n$  e o número de amostras  $N_v = N/2$  disponíveis para validação:

$$FPE = V \left( \frac{1 + \rho/N_v}{1 - \rho/N_v} \right) \quad (30)$$

Considerando que  $\rho \ll N_v$  então:

$$FPE = V(1 + \rho/N_v)$$

tal que:

$$V = \det \left( \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \boldsymbol{\varepsilon}(k, \hat{\theta}) \boldsymbol{\varepsilon}(k, \hat{\theta})^T \right) \quad (31)$$

de forma que  $\boldsymbol{\varepsilon}(k, \hat{\theta})$  é o vetor de erros de simulação cometido para k-ésima amostra e  $\det([.])$  é o determinante da matriz [.].

Além do índice  $FPE$  utiliza-se o índice  $FIT$  que relaciona a percentagem da saída experimental explicada pelo modelo definido como:

$$FIT = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_v} [\tilde{T}_f(k) - T_{exp}(k)]^2}{\sum_{k=1}^{N_v} [T_{exp}(k) - \bar{T}_{exp}]^2}} \quad (32)$$

O modelo que maximiza  $FIT$  e minimiza  $FPE$  é adotado como aquele que melhor representa o sistema. O critério relaciona o compromisso entre a capacidade de simulação e as características da correlação do resíduo.

#### 4.4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO PROCESSO

Os modelos parametrizados segundo a equação (27) são listados na Tabela 1 com os respectivos valores de  $m$ ,  $n$ ,  $FIT$ ,  $FPE$  e regressores:

**Tabela 1: Ordem dos modelos, índices e regressores  $T_s = 300s$**

$m$	$n$	$FIT$	$FPE$	$\varphi$
1	1	86,47	3,07	[-0,9772 -0,1790]
2	1	85,66	3,47	[-1,3260 0,3409 -0,1290]
2	2	86,09	3,26	[0,0365 -0,9833 -0,2745 -0,2903]
3	1	85,46	3,56	[-1,0280 -0,0987 0,1444 -0,1561]
3	2	85,93	3,34	[-0,2891 -0,8557 0,1777 -0,1094 -0,1837]
3	3	86,30	3,16	[0,0246 -0,2618 -0,7035 -0,0780 -0,2283 -0,2226]

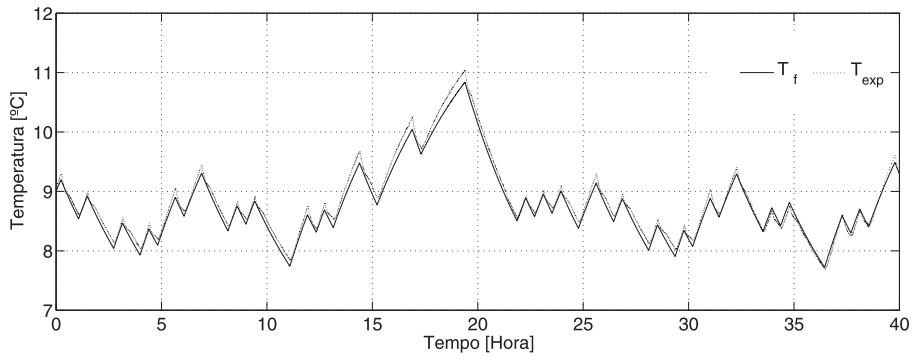
O modelo parametrizado por  $m = n = 1$  oferece vantagens pela baixa complexidade numérica em termos de simulação, maior índice  $FIT$  e menor índice  $FPE$  simultaneamente, sendo portanto eleito como modelo da planta. Neste caso, o processo pode ser

representado por um sistema discreto de primeira ordem com período de amostragem  $T_s = 300\text{s}$  selecionado conforme [28]:

$$\tilde{H}(z, \bar{I}_o = 1,00A) = -\frac{0,1790z^{-1}}{1 - 0,9772z^{-1}} \quad (33)$$

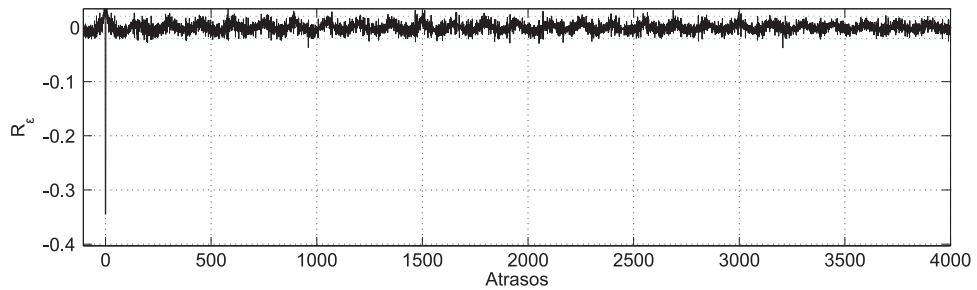
A Figura 20 apresenta a resposta experimental e simulada através da equação (33) para os dados de validação. Nesse caso,  $FIT = 86,47$  e  $FPE = 3,27$ .

**Figura 20: Resposta Experimental e Simulada.**



A análise residual é utilizada para verificar as características do valor experimental não explicado pela simulação conforme Figura 21. Nota-se uniformidade na correlação do resíduo e comportamento periódico. A uniformidade permite afirmar que trata-se de um ruído branco, conforme assumido na equação (22). A periodicidade corresponde à dinâmica da temperatura ambiente sujeita ao controle termostático não explicada pela função de transferência discreta dada por  $\tilde{H}(z, \bar{I}_o = 1,00A)$ .

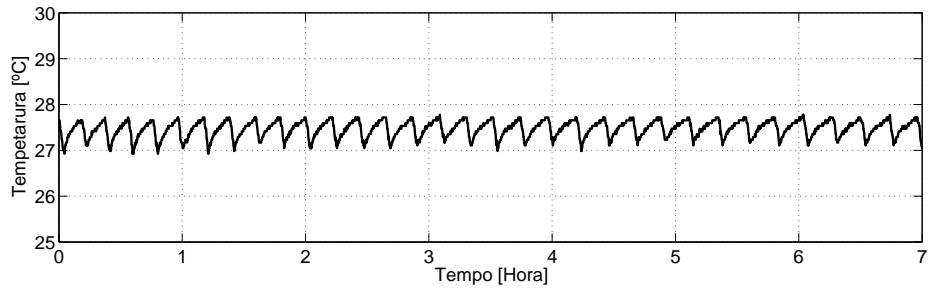
**Figura 21: Autocorrelação do Resíduo Filtrado por  $\tilde{H}^{-1}(z, \bar{I}_o = 1,00A)$ .**



A dinâmica da temperatura ambiente  $T_{amb}$  é apresentada na figura 22. Nesse caso, afirma-se que a periodicidade na função de autocorrelação do resíduo está associada as oscilações da ação de controle termostático da temperatura ambiente. Assim, o valor médio da temperatura ambiente define o valor de  $\bar{I}_o$  para que a temperatura do fluido

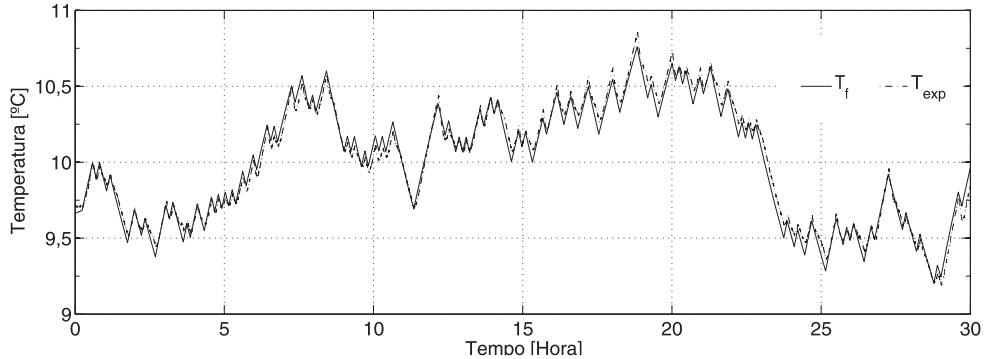
atinja  $\bar{T}_f$ , enquanto que os valores de pico definem a amplitude das oscilações na função de autocorrelação dos resíduos.

**Figura 22: Controle Termostático da Temperatura Ambiente.**



Um segundo experimento foi realizado no intuito de avaliar a capacidade de simulação do modelo adotado conforme Figura 23.

**Figura 23: Resposta Experimental e Simulada para PRBS ( $T_b = 7$  minutos,  $\eta = 8$ ).**



O sinal PRBS é realizado com  $T_b = 7$  minutos e  $\eta = 8$ , tal que  $T_{i(t)} = 29,75$  horas e possui banda espectral ampliada devido ao aumento da ordem do sinal e diminuição do intervalo entre amostras, simultaneamente. Nesse caso,  $FIT = 85,72$  e  $FPE = 4,44$ .

Para finalizar, a caracterização de um modelo em torno da temperatura especificada por norma foi possível em razão da manutenção da temperatura ambiente em um nível médio e com baixas oscilações. A relação da temperatura do fluido como função da corrente de polarização é condicionada a temperatura ambiente e ao dimensionamento do refrigerador. Nesse caso, o modelo validado é recomendado apenas para as condições operacionais ensaiadas.

## 5 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

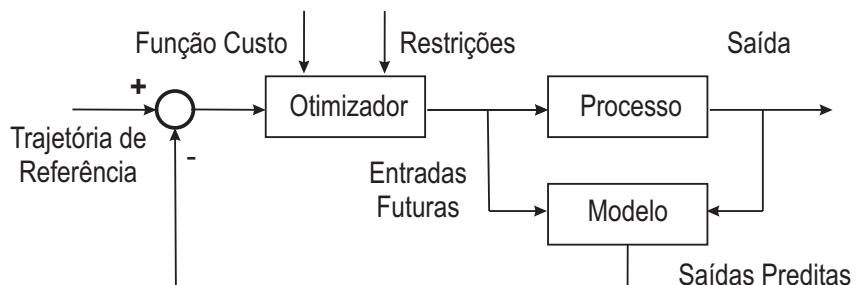
Este capítulo aborda as idéias básicas presentes nas diversas estratégias de controle preditivo. Esclarece particularmente a estratégia de controle preditivo baseada em modelo com restrições na variável de entrada aplicada ao controle da temperatura interna do reservatório de água refrigerada do refrigerador termoelétrico em estudo. O modelo explícito para cálculo de saídas futuras é apresentado, assim como a função custo que considera os objetivos de controle, trajetória de referência e restrições para determinar as entradas futuras a serem aplicadas à planta segundo a estratégia de horizonte deslizante. Adicionalmente é explicitada a regra de sintonia de parâmetros do controlador utilizada para regulação da temperatura da água no reservatório conforme norma associada.

### 5.1 INTRODUÇÃO

O termo Controle Preditivo Baseado em Modelo não designa uma estratégia de controle específica, mas métodos de controle que fazem uso do modelo explícito do processo para obter o sinal de controle através da minimização de uma função objetivo. As estratégias MBPC utilizam modelo explícito para prever as saídas da planta e calcular entradas futuras através da otimização de uma função custo que considera os objetivos de controle, trajetória de referência e restrições utilizando a estratégia de horizonte deslizante [29].

A Figura 24 representa um esquema de controle em malha fechada exibindo os principais elementos que compõe as estratégias de Controle Preditivo Baseadas em Modelo:

**Figura 24: Estrutura Geral do MBPC.**

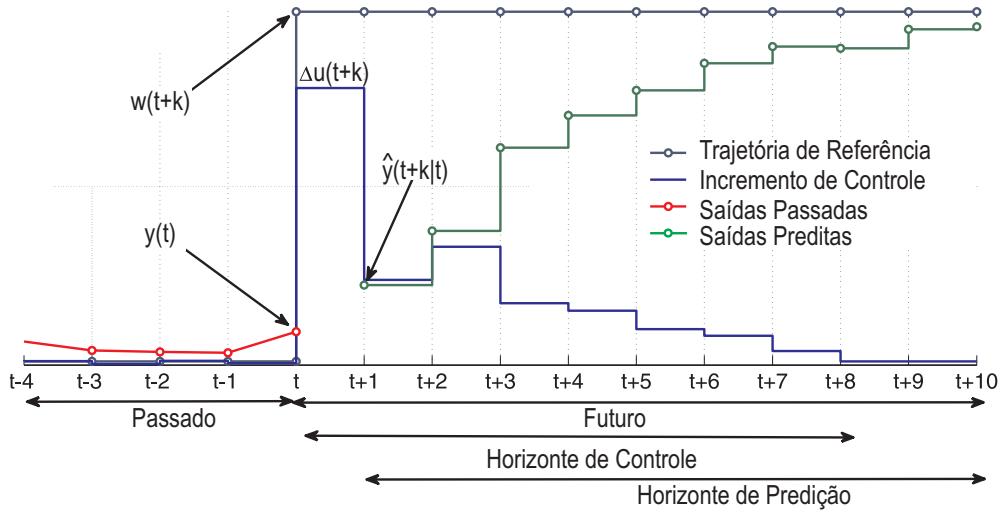


- **Modelo:** modelo explícito do processo utilizado para prever a saída da planta quando sujeita a uma sequência de ações de controle a partir das informações disponíveis realizadas;

- **Otimizador:** algoritmo que minimiza a Função Custo considerando as Restrições, Trajetória de Referência e saídas preditas para cálculo das Entradas Futuras;
- **Função Custo:** é a função objetivo que estabelece o critério a ser otimizado para obtenção das Entradas Futuras;
- **Restrições:** estabelecem os limites operacionais quanto a excursão dos sinais de entrada, saída e variação no sinal de controle para o cálculo das Entradas Futuras;
- **Trajetória de Referência:** determina uma sequência de Referências Futuras para as Variáveis de Saída ou Set-point no modo de regulação.

tal que as estratégias de Controle Preditivo se distinguem em relação ao modelo do processo ou ruído considerado para predição das saídas futuras e da Função Custo a ser minimizada.

**Figura 25: Estratégia de Horizonte Deslizante.**



Nesse caso, o algoritmo que define a lei de controle é implementado conforme as Figuras 24 e 25 segundo a sequência:

1. As saídas preditas  $\hat{y}(t+k|t)$  são calculadas no instante  $t$  a partir do modelo explícito da planta, tal que  $k = N_1 \dots N_2$  definem o Horizonte de Predição. As saídas preditas dependem dos valores da saídas e entradas passadas até o instante  $t$  e da ação de controle futura dada por:  $u(t+k|t)$  para  $k = 0 \dots N_u - 1$  inferidas a partir do incremento de controle  $\Delta u(t+k|t)$ , tal que  $N_u$  define o Horizonte de Controle;
2. Os valores da ação de controle são calculados com base na minimização de uma função objetivo que considera a diferença entre a Trajetória de Referência  $w(t+k)$  e as saídas preditas somada ao Esforço de Controle. Restrições ao sinal de controle,

incremento de controle e excursão da saída são incluídas na otimização da Função Custo;

3. Somente o sinal de controle  $u(t|t)$  é aplicado ao processo e a sequência a partir do Passo 1 é realizada atualizando os valores até o instante  $t$ . Isso se dá porque no próximo passo de amostragem o sinal  $y(t+1)$  já é conhecido e o procedimento é refeito já incluindo este valor. A aplicação apenas de  $u(t|t)$  e atualização da sequência utiliza o conceito de Controle com Horizonte Deslizante.

## 5.2 MODELO DO PROCESSO

O MBPC utiliza modelos explícito para o processo e para as perturbações a fim de determinar as saídas preditas da planta utilizando as informações disponíveis até dado instante. Segundo a escolha desses modelos derivam-se estratégias particulares de controladores preditivos, tal que os métodos mais populares baseiam-se na resposta ao impulso, resposta ao degrau, formulação em espaço de estados, formulação em termos da função de transferência ou em modelos não-lineares.

A estratégia abordada nesta pesquisa utiliza a função de transferência para predição da saída do processo em torno de um ponto de equilíbrio descrito através do modelo linear CARIMA (*Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average*) utilizando o caso de uma entrada e uma saída (SISO):

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})\frac{\varepsilon(t)}{\Delta} \quad (1)$$

tal que  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  e  $C(z^{-1})$  são polinômios dados por:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c} \end{aligned}$$

e  $z^{-1}$  é o operador de atraso,  $\Delta = 1 - z^{-1}$  é um integrador,  $n_a$  é a ordem do polinômio  $A(z^{-1})$ ,  $n_b$  é a ordem do polinômio  $B(z^{-1})$ ,  $n_c$  é a ordem do polinômio  $C(z^{-1})$ ,  $d$  é o atraso de transporte da planta,  $u(t)$  é o sinal de controle,  $y(t)$  é a saída da planta e  $\varepsilon(t)$  representa um ruído branco de média nula. Multiplicando a equação (1) por  $\Delta$  e considerando  $C(z^{-1}) = 1$ :

$$\tilde{A}(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})\Delta u(t-1) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

tal que  $\tilde{A}(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})$ .

A Equação (2) representa a dinâmica do processo modelado em torno de uma região linear considerando perturbação do tipo degrau  $C(z^{-1}) = 1$  e atraso de transporte  $d$ . A consideração  $C(z^{-1}) = 1$  representa a modelagem da perturbação, nesse caso, estima-se que as perturbações associadas ao modelo são lentas e podem ser caracterizadas como degraus ou off-set em relação a  $y(t)$ .

### 5.3 CÁLCULO DE PREDIÇÕES

Para o cálculo do Sinal de Controle por meio da otimização da Função Custo é necessário relacionar as saídas preditas por meio do modelo descrito na Equação (2) utilizando a Equação Diophantina (3):

$$1 = E_k(z^{-1})\Delta A(z^{-1}) + z^{-k}F_k(z^{-1}) \quad (3)$$

Os polinômios  $E_k(z^{-1})$  e  $F_k(z^{-1})$  são definidos com ordem  $k - 1$  e  $n_a$ , respectivamente. Uma forma de se obter estes polinômios, é realizando a divisão de 1 por  $\tilde{A}(z^{-1})$  até o resto poder ser fatorado em função de  $z^{-k}F_k(z^{-1})$ . O quociente da divisão polinomial resultará em  $E_k(z^{-1})$ . Multiplicando a Equação (2) por  $E_k(z^{-1})z^k$ :

$$E_k(z^{-1})\Delta A(z^{-1})y(t+k) = E_k(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+k-d-1) + E_k(z^{-1})\varepsilon(t+k) \quad (4)$$

Considerando a Equação (3), então a Equação (4) pode ser reescrita:

$$(1 - z^{-k}F_k(z^{-1}))y(t+k) = E_k(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+k-d-1) + E_k(z^{-1})\varepsilon(t+k)$$

tal que a predição da saída k-passos a frente é dada por:

$$y(t+k|t) = E_k(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+k-d-1) + F_k(z^{-1})y(t) + E_k(z^{-1})\varepsilon(t+k) \quad (5)$$

Sabendo-se que a ordem de  $E_k = k - 1$ , os termos do ruído da Equação (5) estarão todos no futuro e considerando a predição ótima da saída  $\hat{y}(t+k|t) = \mathbf{E}[y(t+k|t)]$ , uma vez que  $\mathbf{E}[\varepsilon(k)] = 0$  e  $\mathbf{E}[\varepsilon(k)\varepsilon(j)] = 0$ ,  $\forall k \neq j$ , tal que  $\mathbf{E}[\cdot]$  é o operador Valor Esperado:

$$\hat{y}(t+k|t) = E_k(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+k-d-1) + F_k(z^{-1})y(t) \quad (6)$$

fatorando  $E_k(z^{-1})B(z^{-1}) = G_k(z^{-1}) + z^{-k}G'_k(z^{-1})$ , logo a Equação (6) pode ser reescrita:

$$\hat{y}(t+k|t) = G_k(z^{-1})\Delta u(t+k-d-1) + G'_k(z^{-1})\Delta u(t-d-1) + F_k(z^{-1})y(t) \quad (7)$$

Para o conjunto de predições conforme o Horizonte de Predição definidos por  $N_1$  e  $N_2$  a partir da Equação (7):

$$\begin{aligned}\hat{y}(t+N_1|t) &= G_{N_1}(z^{-1})\Delta u(t+N_1-d-1) + G'_{N_1}(z^{-1})\Delta u(t-d-1) + F_{N_1}(z^{-1})y(t) \\ \hat{y}(t+N_1+1|t) &= G_{N_1+1}(z^{-1})\Delta u(t+N_1-d) + G'_{N_1+1}(z^{-1})\Delta u(t-d-1) + F_{N_1+1}(z^{-1})y(t) \\ \hat{y}(t+N_1+2|t) &= G_{N_1+2}(z^{-1})\Delta u(t+N_1-d+1) + G'_{N_2+1}(z^{-1})\Delta u(t-d-1) + F_{N_1+2}(z^{-1})y(t) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+N_2|t) &= G_{N_2}(z^{-1})\Delta u(t+N_2-d-1) + G'_{N_2}(z^{-1})\Delta u(t-d-1) + F_{N_2}(z^{-1})y(t)\end{aligned}$$

em forma matricial:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \underbrace{\mathbf{G}'\Delta u(t-d-1) + \mathbf{F}(z^{-1})y(t)}_f \quad (8)$$

tal que:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+N_1|t) \\ \hat{y}(t+N_1+1|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N_2|t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{N_1} \\ G_{N_1+1} \\ \vdots \\ G_{N_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}' = \begin{bmatrix} G'_{N_1} \\ G'_{N_1+1} \\ \vdots \\ G'_{N_2} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{N_1} \\ F_{N_1+1} \\ \vdots \\ F_{N_2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Percebe-se que os dois últimos termos da Equação (8) dependem somente de sinais passados, podendo ser agrupado em uma variável denominada resposta livre  $f$ , enquanto que o primeiro termo corresponde a resposta forçada do sistema:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + f \quad (10)$$

## 5.4 FUNÇÃO CUSTO

Os algoritmos que utilizam Controle Preditivo Baseado em Modelo propõem diferentes Funções Custo para obtenção do Sinal de Controle. O propósito geral é que a Saída Futura deve seguir o Sinal de Referência conforme Horizonte de Predição e ao mesmo tempo considerar o esforço de controle necessário segundo o Horizonte de Controle [30, 31].

A Função Custo adotada para o controlador preditivo em questão  $J(N_1, N_2, N_u, \lambda)$  é dada por:

$$J(N_1, N_2, N_u, \lambda) = \sum_{k=N_1}^{N_2} [w(t+k) - \hat{y}(t+k|t)]^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_u} [\Delta u(t+k-1)]^2 \quad (11)$$

tal que  $\hat{y}(t+k|t)$  é a predição da saída  $k$  passos a frente dadas informações até o instante  $t$  calculada conforme Equação (7),  $\Delta u$  é a variação do sinal de controle e  $w$  é a trajetória de referência futura. As variáveis  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_u$  e  $\lambda$  são os parâmetros para ajuste do controlador tal que  $N_1$  e  $N_2$  definem o horizonte de predição,  $N_u$  define o horizonte de controle e  $\lambda$  é a ponderação do esforço de controle.

Nesse caso, considera-se que a Variação do Sinal de Controle é nula após o horizonte de controle e no caso, como  $N_1 \geq d+1$  considera-se o atraso de transporte da planta já na parametrização do controlador, ou seja, os sinais só são considerados após a resposta efetiva da planta ao sinal de excitação.

Reescrevendo  $J(N_1, N_2, N_u, \lambda)$  conforme Equação (11) na forma matricial:

$$\begin{aligned} J(N_1, N_2, N_u, \lambda) &= (\mathbf{W} - \hat{\mathbf{Y}})^T (\mathbf{W} - \hat{\mathbf{Y}}) + \Delta \mathbf{u}^T \lambda \Delta \mathbf{u} \\ &= (\mathbf{W} - G\Delta \mathbf{u} - f)^T (\mathbf{W} - G\Delta \mathbf{u} - f) + \Delta \mathbf{u}^T \lambda \Delta \mathbf{u} \\ &= \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T H \Delta \mathbf{u} + b^T \Delta \mathbf{u} + f_0 \end{aligned} \quad (12)$$

em que,

$$\begin{aligned} H &= 2(G^T G + \lambda I) \\ b^T &= 2(f - \mathbf{W})^T G \\ f_0 &= (f - \mathbf{W})^T (f - \mathbf{W}) \end{aligned}$$

tal que  $\Delta \mathbf{u}$  corresponde ao empilhamento  $\Delta \mathbf{u} = [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+N_u-1)]^T$  e para trajetória de referência  $\mathbf{W} = [w(t+N_1) \ w(t+N_1+1) \ \dots \ w(t+N_2)]^T$ .

## 5.5 RESTRIÇÕES

Os problemas reais levam sempre em consideração limites operacionais ligados as capacidades dos componentes envolvidos na malha de controle, limites de segurança para manutenção da integridade do sistema ou limites de tolerância para assegurar critérios de qualidade relacionados aos processos [32].

Os controladores preditivos utilizam as restrições de forma explícita para o cálculo do sinal de controle, por outro lado, as estratégias clássicas aplicam mecanismos indiretos para os limites reais de um sistema, frequentemente restringindo as operações à regiões que não excedem os limites práticos, saturando os sinais dos atuadores ou transdutores [33].

A descrição matemática de restrições nos limites da amplitude do sinal de saída, variação do sinal do controle e amplitude do sinal de controle de maneira linear são explicadas nos ítems a seguir.

A representação linear deve-se ao algoritmo para solução do problema de otimização formulado a partir da minimização da função objetivo e da representação genérica das restrições considerando a sequência na variação de controle como a variável de decisão [34].

### 5.5.1 Limites na Amplitude do Sinal de Saída

Seja o sinal de saída com limite inferior  $y_{min}$  e superior  $y_{max}$ :

$$Y_{min} \leq \hat{\mathbf{Y}} \leq Y_{max} \quad (13)$$

como  $\hat{\mathbf{Y}}$  pode ser escrito em função de  $\mathbf{G}$  e  $f$  conforme a Equação (10), a Equação (13) pode ser reescrita:

$$Y_{min} \leq \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + f(t) \leq Y_{max}$$

na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} G \\ -G \end{bmatrix} \Delta\mathbf{u} = \begin{bmatrix} Y_{max} - f(t) \\ f(t) - Y_{min} \end{bmatrix} \quad (14)$$

tal que  $Y_{min}$  e  $Y_{max}$  são vetores com a mesma dimensão de  $\hat{\mathbf{Y}}$  com todos os elementos iguais a  $y_{min}$  e  $y_{max}$ , respectivamente.

### 5.5.2 Limites na Variação do Sinal de Controle

Seja a variação do sinal de controle com limite inferior  $\Delta u_{min}$  e superior  $\Delta u_{max}$ :

$$\Delta U_{min} \leq \Delta \mathbf{u} \leq \Delta U_{max} \quad (15)$$

na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \leq \begin{bmatrix} \Delta U_{max} \\ -\Delta U_{min} \end{bmatrix} \quad (16)$$

tal que  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade com dimensão  $N_u \times N_u$ ; e,  $\Delta U_{min}$  e  $\Delta U_{max}$  são vetores com a mesma dimensão de  $\Delta \mathbf{u}$  com todos os elementos iguais a  $\Delta u_{min}$  e  $\Delta u_{max}$ , respectivamente.

### 5.5.3 Limites na Amplitude do Sinal de Controle

Seja a amplitude do sinal de controle com limite inferior  $u_{min}$  e superior  $u_{max}$ . Tem-se que:

$$u(t+j) = \sum_{i=0}^j \Delta u(t+i) + u(t-1) \quad (17)$$

nesse caso:

$$\mathbf{I} u_{min} \leq \mathbf{T} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{I} u(t-1) \leq \mathbf{I} u_{max}$$

na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ -\mathbf{T} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{I} (u_{max} - u(t-1)) \\ \mathbf{I} (u(t-1) - u_{min}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

tal que  $\mathbf{T}_{N_u \times N_u}$  é uma matriz triangular inferior com os elementos acima da diagonal principal nulos e demais elementos iguais a 1.

As restrições podem ser aplicadas simultaneamente através do empilhamento das matrizes apresentadas em (14), (16) e (18) conforme melhor modelagem das condições operacionais. Outras restrições podem ser modeladas de forma linear.

Para fins desta pesquisa, apenas restrições na amplitude do sinal de controle são consideradas:

- Limita-se o sinal de controle inferior a zero de tal modo que não se admite inversão no sinal de controle e consequentemente a mudança de polarização do módulo Peltier, isto é, o sistema opera apenas no modo de refrigeração;
- Limita-se o sinal de controle superior à corrente máxima suportada pelo Módulo Peltier segundo especificações técnicas do produto.

Considerando restrições somente com respeito a amplitude do sinal de controle:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ -\mathbf{T} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} (u_{max} - u(t-1)) \\ \mathbf{I} (u(t-1) - u_{min}) \end{bmatrix}$$

tal que as dimensões das matrizes  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{I}$  estão associadas ao parâmetro  $N_u$  conforme sintonia a ser implementada para fins de atendimento aos requisitos normativos que determinam as condições de operação do equipamento. Nesse caso as restrições são representadas de maneira linear conforme a equação (19):

$$\mathbf{R} \Delta \mathbf{u} \leq \mathbf{l} \tag{19}$$

## 5.6 OTIMIZAÇÃO DA FUNÇÃO CUSTO

### 5.6.1 Caso sem Restrições

A cada período de discretização formula-se um Problema de Programação Quadrática sem Restrições definido pela minimização de função objetivo  $J(N_1, N_2, N_u, \lambda)$  em função da variável de decisão  $\Delta \mathbf{u}$ :

$$\Delta \mathbf{u} : \quad \text{minimizar} \quad \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T H \Delta \mathbf{u} + b^T \Delta \mathbf{u} + f_0 \tag{20}$$

O mínimo do Problema de Programação Quadrática sem Restrições definido em 20 pode obtido por meio analítico pelo cálculo do gradiente de  $J$  com respeito a  $\Delta \mathbf{u}$ :

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{u}} = 0 \tag{21}$$

isto é:

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{H}^{-1}\mathbf{b} = \underbrace{(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T}_{\mathbf{K}} (\mathbf{W} - f) \quad (22)$$

Portanto trata-se de uma lei de controle linear considerando  $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T = \mathbf{K}$ .

### 5.6.2 Caso com Restrições

A cada período de discretização formula-se um Problema de Programação Quadrática sujeito a Restrições Lineares definido pela minimização de função objetivo  $J(N_1, N_2, N_u, \lambda)$  em função da variável de decisão  $\Delta \mathbf{u}$  sujeito às restrições  $R\Delta \mathbf{u} \leq l$ :

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u} : \quad & \text{minimizar} && \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T H \Delta \mathbf{u} + b^T \Delta \mathbf{u} + f_0 \\ & \text{sujeito a} && R \Delta \mathbf{u} \leq l \end{aligned} \quad (23)$$

## 5.7 HORIZONTE DESLIZANTE

Segundo a estratégia de Controle com Horizonte Deslizante ( Receding Horizon Control ) aplica-se ao processo somente o sinal referente ao primeiro elemento de  $\Delta \mathbf{u}$ :

$$u(t) = \Delta u(t) + u(t-1)$$

ou seja, uma vez obtida a sequência de controle  $\Delta \mathbf{u}$ , calcula-se o sinal de entrada a ser aplicado a planta baseado apenas em  $\Delta u(t)$ , faz-se a atualização das informações do sinal de saída e entrada e resolve-se novamente o problema de otimização para o próximo período de controle.

A estratégia RHC permite que sistema em malha fechada responda às perturbações a que o sistema está submetido e às dinâmicas não representadas pelo modelo utilizado para predição das saídas futuras [35].

## 5.8 AJUSTE DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR

O ajuste do controlador preditivo segundo a Função Custo 11 baseia-se na escolha inicial de valores dos parâmetros  $N_1, N_2, N_u$  e  $\lambda$  para formulação do Problema de Programação Quadrática e posterior refinamento dos mesmos conforme requisitos de desempenho do processo em malha fechada [36].

O período de acomodação do processo em malha fechada torna-se um requisito de desempenho a ser considerado na seleção do período de amostragem  $T_s$  para fins de discretização do modelo da planta e determinação dos parâmetros do controlador. Nesse caso,  $T_s$  deve ser de 20 a 10 vezes menor que o tempo de acomodação do sistema em malha fechada [37].

Uma vez determinado o período de amostragem  $T_s$  da planta conforme requisito de tempo de acomodação em malha fechada recorre-se a alternativas para definição de um conjunto inicial para os parâmetros do controlador. O método da Curva de Reação ou Resposta ao Degrau relatado em [29] é utilizado como uma alternativa para definição de valores iniciais dos parâmetros para plantas estáveis. O método consiste na excitação da planta por um degrau na entrada e aproximação da resposta da mesma por um sistema contínuo de primeira ordem com atraso considerando o ganho do processo  $K_p$ , a constante de tempo do processo  $\tau$  e o atraso de transporte  $\tau_d$  segundo a função de transferência da equação (24):

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\tau_d s}}{\tau s + 1}; \quad (24)$$

Caso o atraso de transporte  $\tau_d$  do modelo contínuo seja múltiplo inteiro do período de amostragem  $T_s$ , isto é,  $\tau_d = d T_s$ , a função transferência discreta do processo é definida por:

$$G(z^{-1}) = \frac{b z^{-1}}{1 - a z^{-1}} z^{-d}; \quad (25)$$

tal que:

$$a = e^{-\frac{T_s}{\tau}} \quad b = K_p (1 - a) \quad d = \frac{\tau_d}{T_s}$$

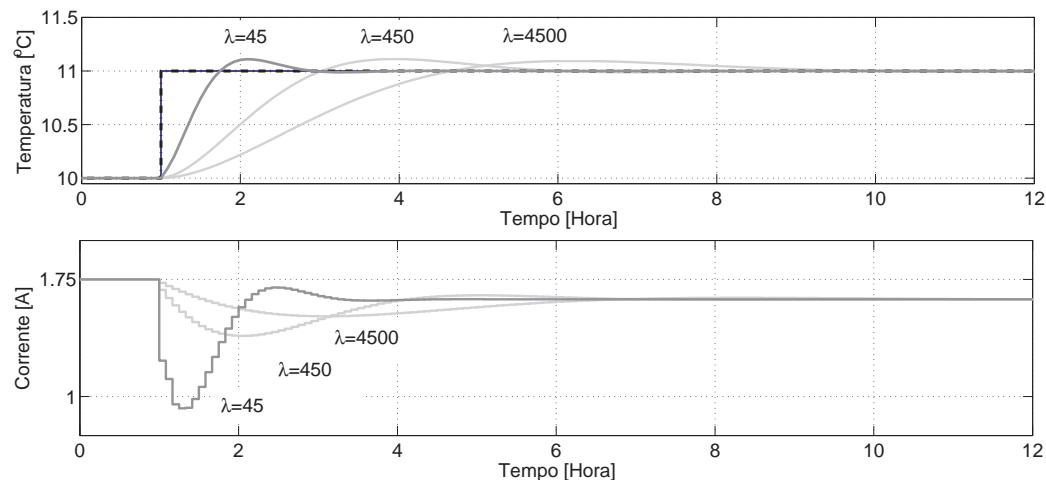
Nesse caso os parâmetros do controlador sugeridos por [29] são selecionados conforme significado dos mesmos na formulação do Problema de Programação Quadrática:

- $N_1$ : o horizonte de predição mínimo deve ser escolhido como um valor maior que o atraso, por exemplo  $N_1 \geq d + 1$ . O horizonte de controle mínimo define a partir de qual período será considerado o erro em relação à referência, portanto, para plantas com atraso só após o período  $d + 1$  que ocorrerá efetiva variação do sinal de saída; antes desse valor as ações de controle não são percebidas na saída do sistema. Para plantas de fase não mínima considera-se  $N_1$  maior que o período da resposta reversa da planta;
- $N_2$ : o horizonte de predição máximo deve ser maior que  $N_1$ . Inicialmente é escolhido um valor maior que o período de acomodação em malha fechada. A sugestão deve-se

ao fato que após atingir a referência em malha fechada, a ponderação com respeito ao primeiro somatório da Função Custo na equação (11) assume valor nulo, não afetando na minimização de  $J(N_1, N_2, N_u, \lambda)$ ;

- $N_u$ : o horizonte de controle é considerado inicialmente como  $N_u = N_2 - N_1$ . O valor de  $N_u$  estabelece através do segundo somatório da Função Custo na equação (11) a consideração sobre o esforço de controle necessário para que a saída atinja a referência. Nesse caso, considera-se o menor valor de  $N_u$  a quantidade de períodos necessários para que a saída do sistema em malha fechada permaneça na referência;
  - $\lambda$ : a ponderação do esforço de controle é inicialmente  $\lambda = K_p^2$  conforme [38]. O fator quadrático deve-se a uma equiparação numérica entre os dois somatórios considerados na função custo e ganho do sistema. O valor de  $\lambda$  representa o quanto de esforço de controle deve ser considerado para regulação da saída. Quanto maior o valor de  $\lambda$ , mais lenta será a resposta do sistema em função da relevância da ponderação do segundo somatório referente à energia necessária para regulação. Por outro lado, o valor menor de  $\lambda$  implica em respostas mais rápidas em função da importância sobre a energia de controle ser diminuída em relação à regulação da saída. A Figura 26 apresenta o impacto da variação de  $\lambda$  utilizando o modelo de primeira ordem identificado: quanto maior  $\lambda$ , maior o tempo para fechamento da malha devido maior ponderação sobre o esforço de controle na minimização da função custo.

Figura 26: Influência do parâmetro  $\lambda$ : período de fechamento de malha.



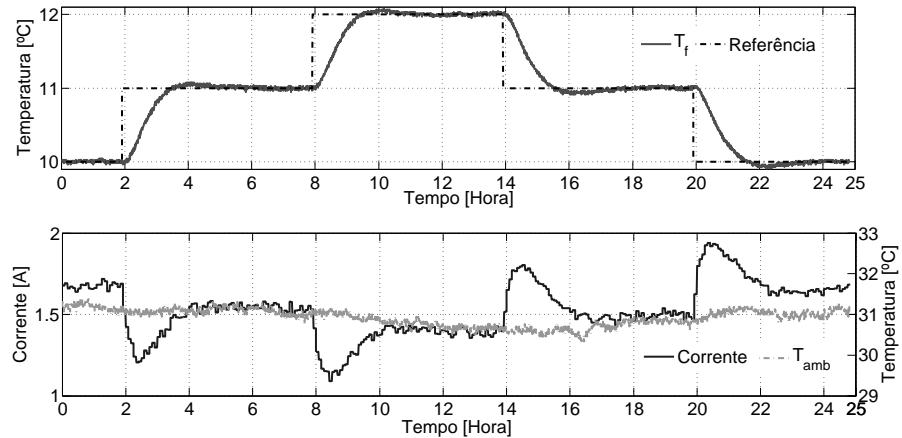
## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA DE CONTROLE

Para todos os experimentos a seguir, apenas o modelo de primeira ordem parametrizado com  $T_s = 300\text{s}$  é utilizado para previsões da saída da planta e a sintonia dos parâmetros é fixa com  $N_1 = 1$ ,  $N_2 = 30$ ,  $N_u = 28$ ,  $u_{max} = 3,00$ ,  $u_{min} = 0,00$  e  $\lambda = 45$ , explorando a capacidade de explicação do comportamento da planta pelo modelo obtido na seção anterior e período de fechamento de malha de aproximadamente 1,50 horas. No experimento de identificação a temperatura ambiente  $\tilde{T}_{amb}$  foi regulada em modo biestável conforme a Figura 22, nos experimentos associados ao sistema de controle em malha fechada, a temperatura ambiente  $\tilde{T}_{amb}$  não é controlada, sendo a mesma considerada uma perturbação ao sistema de regulação da temperatura do reservatório de água gelada.

### 6.1 OPERAÇÃO EM REGIÃO LINEAR

A Figura 27 apresenta o comportamento dinâmico da temperatura do fluido  $T_f$  quanto ao seguimento de referência e regulação em ambiente com temperatura ambiente não controlada  $T_{amb}$ . Explicita a capacidade de elevar, regular e diminuir a temperatura do fluido em malha fechada dentro de região linear sem saturar o sinal de controle do MBPC.

**Figura 27: MBPC: Região linear.**

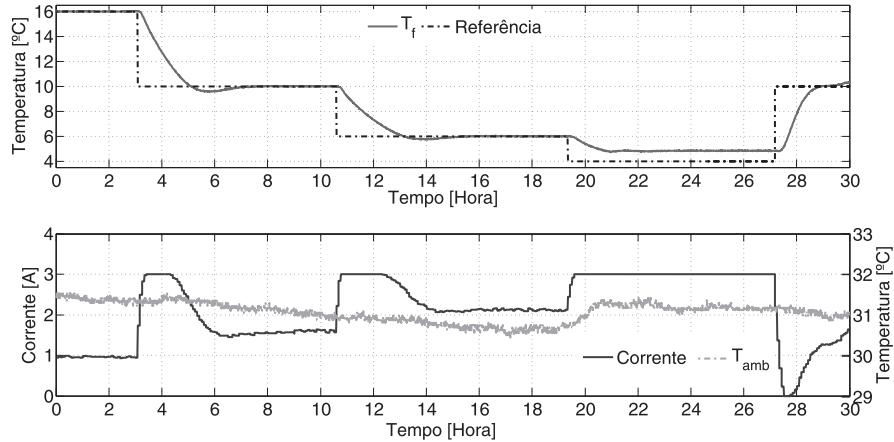


### 6.2 OPERAÇÃO COM SATURAÇÃO DO SINAL DE CONTROLE

O experimento plotado na Figura 28 explora a capacidade de seguimento de referência e regulação ampliando os limites de excursão da temperatura do fluido e determina

a mínima temperatura atingida ao saturar o sinal de controle por 8 horas.

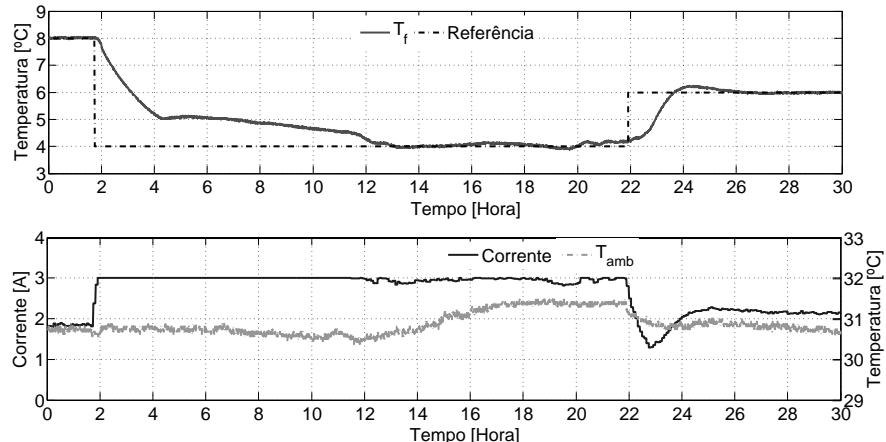
**Figura 28:** MBPC: Saturação do sinal de controle.



### 6.3 OPERAÇÃO EM REGIÃO NÃO-LINEAR

O controle da temperatura do fluido no reservatório refrigerado considerando o comportamento anômalo da densidade da água é apresentado na Figura 29. Nesse caso, a densidade da água tem comportamento não linear em torno de  $4^{\circ}\text{C}$  [39], gerando correntes de convecção divergentes no volume de controle, o que representa um limite econômico prático para o sistema. Adicionalmente, o experimento caracteriza a capacidade de regulação a  $6^{\circ}\text{C}$  a partir da região não linear.

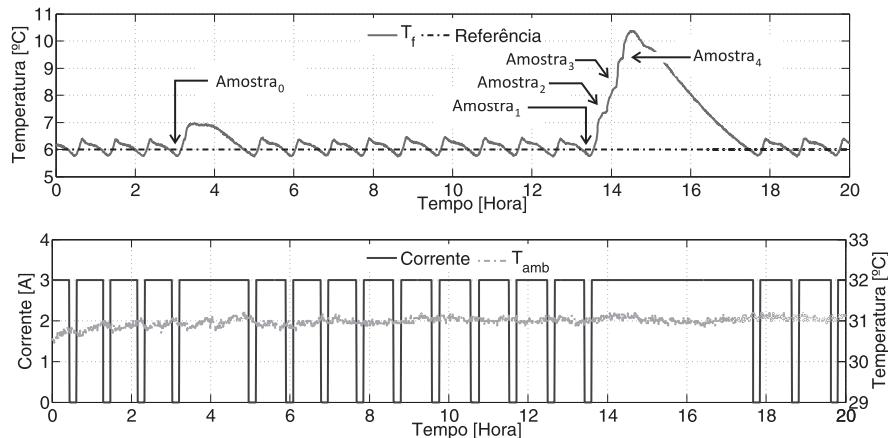
**Figura 29:** MBPC: não-linearidade.



## 6.4 OPERAÇÃO COM REGULAÇÃO SUJEITO A PERTURBAÇÃO

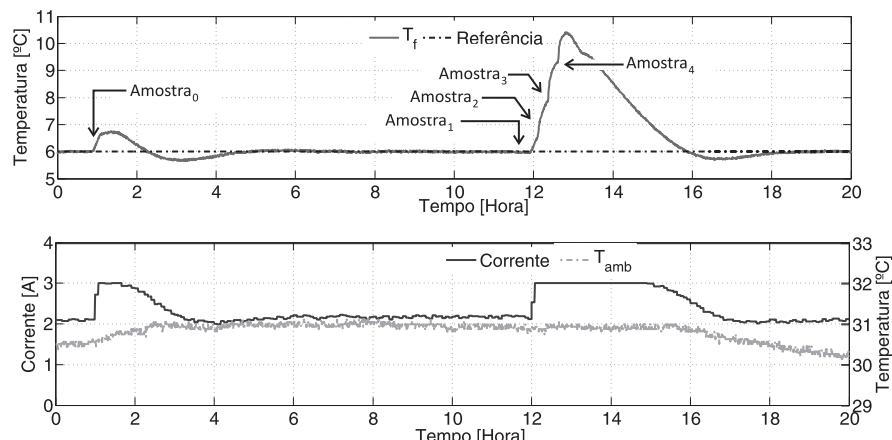
A Figura 30 representa o desempenho da regulação em modo termostático quando o sistema é perturbado ao drenar  $180mL$  de água refrigerada do volume de controle no instante  $t=3$  horas identificado por Amostra<sub>0</sub>. Após 12 horas de experimento, são drenadas 4 porções de  $180mL$  a cada 15 minutos com reposição de volume drenado à temperatura ambiente identificadas por Amostra<sub>1</sub>, Amostra<sub>2</sub>, Amostra<sub>3</sub> e Amostra<sub>4</sub>. O experimento é realizado com o objetivo de avaliar a capacidade de refrigeração do sistema segundo critérios normativos.

**Figura 30: Termostato: Rejeição de Perturbação.**



A Figura 31 apresenta os resultados para o mesmo experimento utilizando MBPC:

**Figura 31: MBPC: Rejeição de Perturbação.**



A Amostra<sub>0</sub> foi realizada no instante  $t=1$  hora e tem objetivo de verificar desempe-

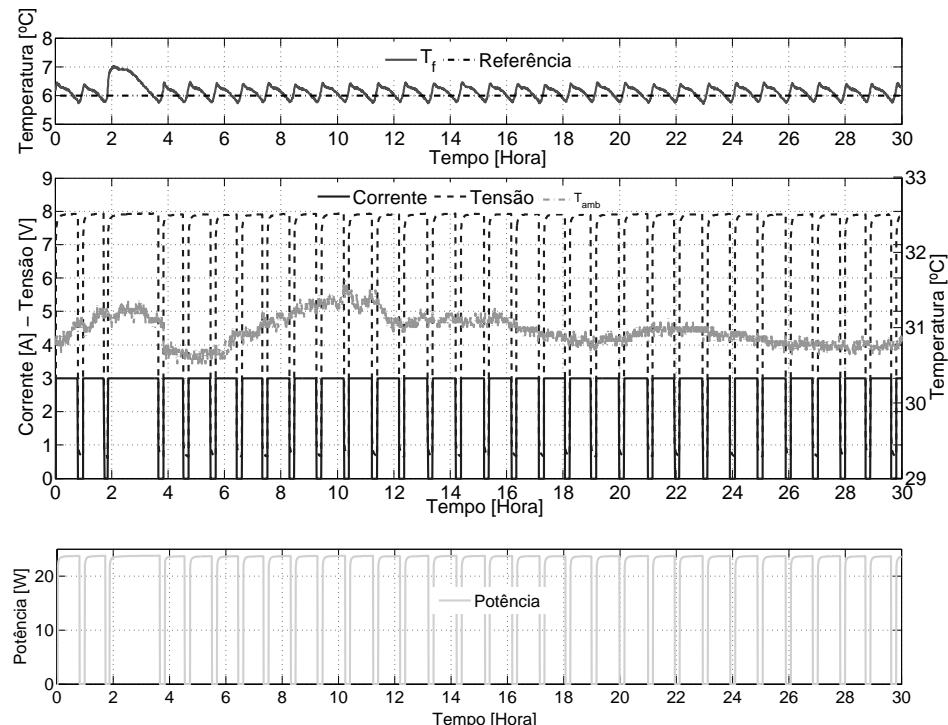
nho da sintonia proposta para o controlador quando é drenada do reservatório de água gelada uma única porção de  $180mL$  de água gelada.

Comparando os resultados apresentados nas Figuras 30 e 31, equiparam-se desempenhos dos controladores quanto ao tempo para rejeição de perturbações e capacidade de refrigeração, pois, tão logo detectada a perturbação, o sinal de controle no modo MBPC entra em saturação, com benefício de garantir menos oscilações, menor sobressinal e temperatura de pico compatível conforme os resultados experimentais nas Figuras 30 e 31.

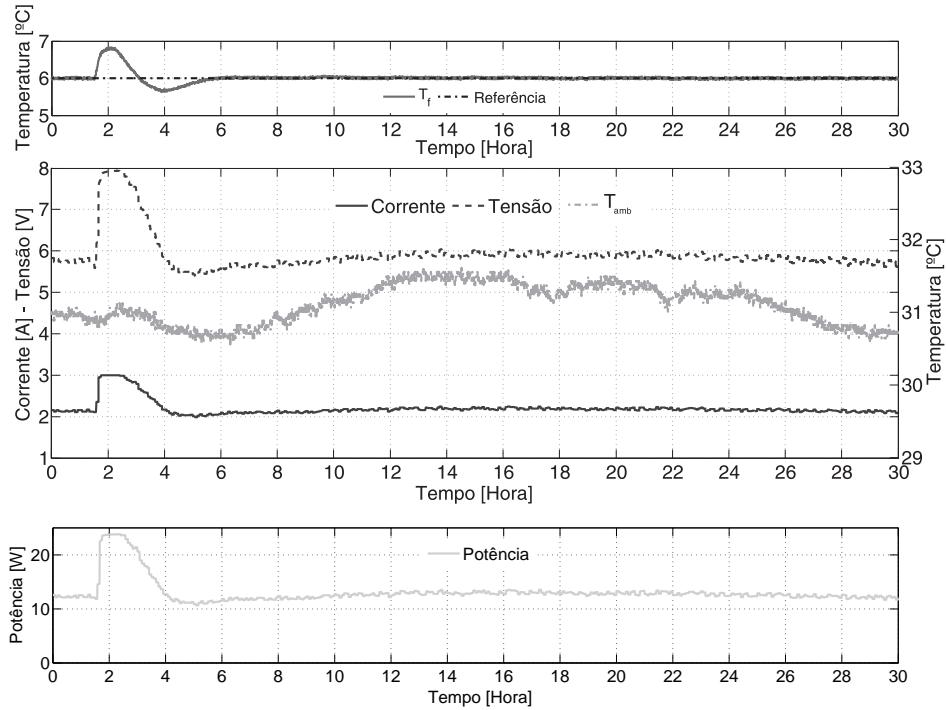
## 6.5 MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MODO STANDBY

Os experimentos registrados nas Figuras 32 e 33 são realizados no intuito de avaliar o consumo de energia elétrica durante um período de 24 horas para regulação da temperatura do fluido ao menor valor operacional de referência do equipamento. O valor para o consumo de energia elétrica do equipamento é realizado mediante o somatório da potência instantânea fornecida pelo drive de potência calculada por meio do produto das variáveis medidas corrente  $\times$  tensão no período de 24 horas após o instante  $t=6$  horas.

**Figura 32: Consumo de Energia: Termostato - Set-point Temperatura Mínimo.**



Percebe-se na Figura 32 uma tensão remanescente devido à capacidade de geração de energia do módulo termoelétrico. Trata-se de fenômeno inverso àquele explorado nesse dispositivo, isto é, quando submetidos a um gradiente de temperatura, os termoelementos

**Figura 33: Consumo de Energia: MBPC - Set-point Temperatura Mínimo.**

geram uma determinada potência elétrica, no entanto esse potencial não é explorado no sistema.

Na Figura 33 nota-se que a sensibilidade da tensão à variação de temperatura ambiente é mais intensa que a mesma propriedade da corrente elétrica que alimenta o sistema, o que implica nas características relacionadas ao consumo de energia para regulação.

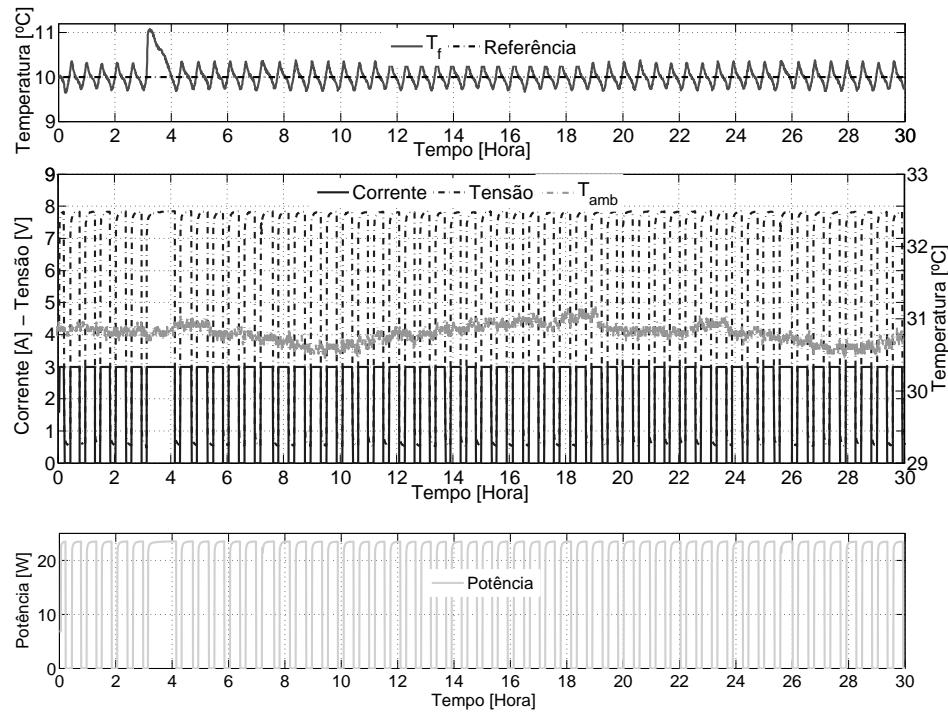
As Figuras 34 e 35 exibem os resultados do experimento para cálculo do consumo de energia elétrica diário conforme critérios para obtenção de Certificado ENERGY STAR® [10]. O critério especifica requisitos limites para o consumo de energia elétrica diário para regulação de temperatura em  $10 \pm 1^{\circ}\text{C}$  do fluido no interior do recipiente conforme tabela 2:

**Tabela 2: Critério de Qualificação ENERGY STAR®.**

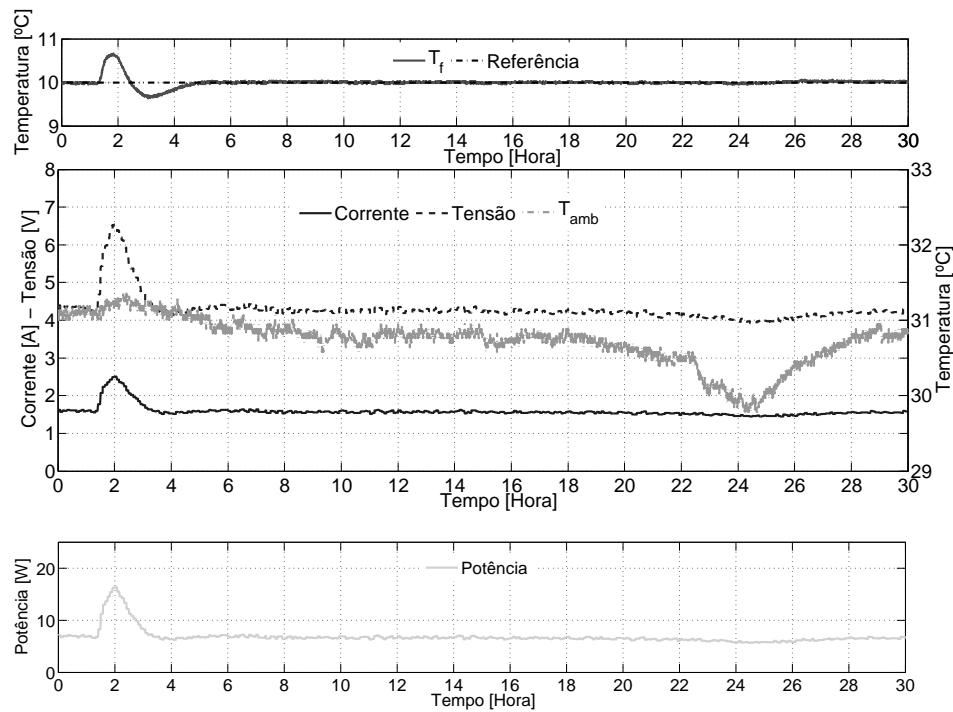
Tipo de Bebedouro	Consumo de Energia [KWh/dia]
Água Refrigerada	$\leq 0,16$
Água Refrigerada e Aquecida	$\leq 1,20$

Adaptado de [10].

**Figura 34: Consumo de Energia: Termostato - regulação em  $10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .**



**Figura 35: Consumo de Energia: MBPC - regulação em  $10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .**



A tabela 3 apresenta os resultados relacionados aos experimentos registrados nas Figuras 32, 33, 34 e 35 realizados para cálculo do consumo de energia num período de 24 horas necessário para regular a temperatura do fluido:

**Tabela 3: Consumo×Economia de Energia Elétrica.**

Temp [°C]	Consumo [KWh/dia]		Economia [%]
	Termostato	MBPC	
6	0,46	0,30	34,22
10	0,35	0,15	55,82

Percebe-se que o MBPC propicia ao sistema regulação da temperatura do fluido habilitando-o aos requisitos de consumo de energia elétrica conforme Certificado ENERGY STAR® ao consumir 0,15KWh/dia para regulação da temperatura em  $10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . O objetivo não é alcançado para o controle por meio de termostato que requer 0,35KWh/dia para regulação em mesmas condições operacionais, enquanto que o requisito de consumo máximo é 0,16KWh/dia. Além de atender aos requisitos para certificação, o MBPC permite uma economia de 55,82% no consumo de energia elétrica em relação ao termostato.

O MBPC permite economia de 34,22% de energia elétrica em relação ao modo baseado em termostato para regulação em  $6 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , sendo esse valor a economia mínima oferecida por essa nova estratégia de controle para o sistema ao consumir 0,30KWh/dia em comparação aos 0,46KWh/dia consumidos pelo sistema controlado por termostato.

Ainda, o consumo de 0,30KWh/dia em referência operacional mínima  $6^{\circ}\text{C}$  no modo MBPC é menor que o consumo de 0,35KWh/dia necessário para o modo de regulação baseado no termostato operar em *set-point*  $10^{\circ}\text{C}$ . A comparação assegura que a técnica MBPC permite economia de energia em toda faixa operacional em comparação ao controle via termostato.

## 7 CONCLUSÃO

Um modelo dinâmico linear do sistema de refrigeração termoelétrico foi desenvolvido em torno de um ponto de equilíbrio especificado em norma. A ordem do modelo fenomenológico serviu para delimitar o espaço de busca do vetor de regressores no desenvolvimento de um modelo discreto obtido através das técnicas de identificação de sistemas. Para fins de validação foram adotados os critérios *FIT* e *FPE* que relacionam a capacidade de simulação do modelo e as características do resíduo, além de experimento em malha fechada utilizando modelo para seguimento de referência e regulação de temperatura do fluido sujeito a temperatura ambiente não controlada e demais perturbações.

As variações na temperatura ambiente são notadas na auto-correlação do resíduo, uma vez que estas não são explicadas no modelo de primeira ordem identificado que considera apenas a influência da corrente de excitação do módulo termoelétrico no experimento de identificação da planta e parametrização do modelo, considerando a influência do ambiente uma perturbação ao modelo.

O projeto via MBPC permite ao sistema regulação de temperatura com muito menos ondulações que o modo via termostato. A sintonia proposta para o MBPC habilita o sistema a atingir desempenho equiparado ao sistema controlado por termostato quanto a máxima e mínima temperatura do fluido estanque no reservatório, mantendo as características de limites operacionais viabilizados pelo sistema de controle baseado no termostato.

Através do MBPC foi possível relacionar o limite máximo de  $3,00A$  para corrente elétrica com o comportamento anômalo da água para temperaturas em torno de  $4^{\circ}C$ , definindo um limite econômico tanto para o consumo de energia como para o especificação do projeto da fonte de potência.

O projeto de controle MBPC assegura rejeição de perturbações tanto com respeito à variações da temperatura ambiente como em relação a reposição de água à temperatura ambiente ao drenar mesmo volume de água do reservatório refrigerado. A metodologia assegura regulação da temperatura do reservatório e seguimento de referência em toda faixa operacional de set-point ( 6 até  $10^{\circ}C$  ).

A aplicação do MBPC possibilita ao sistema atender a requisitos para obtenção de Certificado ENERGY STAR® não factíveis de serem serem realizados a projeto de controle via termostato, além do atendimento ao limites operacionais e requisitos de desempenho especificados nas normas ANSI 18 [6], ARI 1010 [7], UL 399 [8] e C815 [5].

O MBPC permite economia no consumo de energia para toda faixa operacional em relação ao processo regulado por termostato. Os resultados obtidos encorajam a implementação de *hardware* embarcado para controle do sistema substituindo a simplicidade

dos termostatos legados dos sistemas baseados em motocompressores pela sofisticação de sistemas de controle baseado em modelo, explorando as vantagens das refrigeração termoelétrica para tais dispositivos.

Embora seja um item comercializado mundialmente, as normas internacionais ainda estão se atualizando ao método de refrigeração termoelétrico aplicados a bebedouros de mesa. Apenas as normas UL399 [8] e C815 [5] tratam a nova tecnologia de refrigeração utilizada nos eletrodomésticos em questão, ainda assim, são equiparados a equipamentos refrigerados por motocompressores controlados por termostato.

## REFERÊNCIAS

- [1] UNIDAS, O. das N. *Report of the United Nations Conference on Sustainable Development*. Brasil: Rio de Janeiro, 20-22 junho, 2012.
- [2] ENERGIA, M. de Minas e. *Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas*. Brasil: Brasília, 2011.
- [3] SCHULTZ, W. R.; TROY; MICH. Patent. *Combined Hot and Cold Fluid Dispensing Apparatus*. Estados Unidos: The United States Patent and Trademark Office.
- [4] ABNT. *NBR 13972: Bebedouros com refrigeração mecânica incorporada - Requisitos de qualidade, desempenho e instalação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.
- [5] CSA. *Standard C815: Energy Performance of Drinking-Water Coolers*. Canadá: Canadian Standards Association, 2009.
- [6] ASHRAE. *Standard ANSI18: Methods of Testing for Rating Drinking-Water Coolers with Self-Contained Mechanical Refrigeration*. Estados Unidos: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2008.
- [7] ARI. *Standard ARI1010: Self Contained, Mechanically Refrigerated Drinking water Coolers*. Estados Unidos: Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, 2002.
- [8] UL. *UL399: Standard for Drinking-Water Coolers*. Estados Unidos: Underwriters Laboratories, 2008.
- [9] ELETROBRAS. *Relatório de resultados do PROCEL 2011*. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.
- [10] US-DOE. *ENERGY STAR® Program Requirements: Product Specification for Water Coolers*. Estados Unidos: US Environmental Protection Agency and US Department of Energy, Versão 2, 2013.
- [11] CLARKE, D.; MOTHADI, C.; TUFFS, P. Generalized predictive control. part i the basic algorithm and part ii extensions and interpretations. *Automatica*, v. 23, n. 2, p. 137–160, 1987.
- [12] ROSSITER, J. *Model-based predictive control*. 1. ed. Estados Unidos: CRC PRESS, 2004. (Control Series). ISBN 0-8493-1291-4.
- [13] ASTRAIN D. E VIAN, J. G. Computational model for refrigerators based on peltier effect application. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, n. 17-18, p. 3149 – 3162, 2005. ISSN 1359-4311.
- [14] RIFFAT S. B. E XIAOLI, M. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, n. 8, p. 913 – 935, 2003. ISSN 1359-4311.

- [15] HODES, M. On one-dimensional analysis of thermoelectric modules (tems). *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 2, p. 218–229, June 2005. ISSN 1521-3331.
- [16] HUANG, B. J.; DUANG, C. System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration*, v. 23, p. 197–207, 2000.
- [17] CHAVEZ J.A. E ORTEGA, J. Spice model of thermoelectric elements including thermal effects. *IMTC*, v. 2, p. 1019–1023 vol.2, 2000.
- [18] ASTRAIN D. E VIAN, J. G. Increase the cop in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, p. 2183–2200, 2003.
- [19] RITZER, P. G. L. T. M.; BOGARD, A. D. A critical evaluation of today's thermoelectric modules. 1997.
- [20] ASTROM K.J. E HAGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. 2. ed. North Carolina: Instrument Society of America, 1995.
- [21] MIN G. E ROWE, D. M. Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators. *Applied Energy*, v. 83, n. 2, p. 133 – 152, 2006. ISSN 0306-2619.
- [22] INCROPERA F. P. E DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [23] ROWE D. M. E BHANDARI, C. M. Theoretical analysis of the thermoelectric figure of merit. *Energy Conversion and Management*, v. 20, n. 2, p. 113 – 118, 1980. ISSN 0196-8904.
- [24] LJUNG, L. *System Identification: theory for user*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999.
- [25] LI T. E GEORGAKIS, C. Dynamic input signal design for the identification of constrained systems. *Journal of Process Control*, v. 18, n. 3-4, p. 332 – 346, 2008. Festschrift honouring Professor Dale Seborg.
- [26] AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [27] ASTROM, K.; HAGANDER, P.; STERNBY, J. Zeros of sampled systems. *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, v. 19, p. 1077–1081, Dec. 1980.
- [28] ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*. third. New Jersey: Prentice Hall, 2011.

- [29] CAMACHO E. F. E BORDONS, C. *Model Predictive Control*. London: Springer-Verlag, 2004.
- [30] NORMEY-RICO J.E. E CAMACHO, E. *Control of Dead-time Processes*. London: Springer-Verlag, 2007.
- [31] MACIEJOWSKI, J. *Predictive Control: With Constraints*. Harlow, England: Prentice Hall, 2002. (Pearson Education). ISBN 9780201398236.
- [32] CLARKE, D.; MOTHADI, C.; TUFFS, P. Generalized predictive control. part ii extensions and interpretations. *Automatica*, v. 23, n. 2, p. 137–160, 1987.
- [33] ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. *Advanced Pid Control*. Research Triangle Park, NC 27709: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. ISBN 9781556179426.
- [34] CAMACHO, E. Constrained generalized predictive control. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 38, n. 2, p. 327–332, 1993. ISSN 0018-9286.
- [35] TSANG, T.; CLARKE, D. Generalised predictive control with input constraints. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, v. 135, n. 6, p. 451 – 460, nov 1988. ISSN 0143-7054.
- [36] SOETERBOEK, R. *Predictive control: a unified approach*. New York: Prentice Hall, 1992. (Prentice-Hall international series in systems and control engineering). ISBN 9780136783503.
- [37] ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design, Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall, 2011. (Dover Books on Electrical Engineering Series). ISBN 9780486486130.
- [38] BRAVO, C. O. A.; NORMEY-RICO, J. E. Approach for non-linear predictive control based on the local model ideas. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*.
- [39] BALL, P. Water - an enduring mystery. *Nature*, v. 452, p. 291–292, 2008.

## ANEXO A – REQUISITOS DE ELEGIBILIDADE À CERTIFICAÇÃO ENERGYSTAR®



### ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Water Coolers

#### Eligibility Criteria Version 1.3

Following is the **Version 1.3** product specification for ENERGY STAR qualified water coolers. A product shall meet all of the identified criteria if it is to earn the ENERGY STAR.

**1) Definitions:** Below are the definitions of the relevant terms in this document.

- A. **Water Cooler:** A freestanding device that consumes energy to cool and/or heat water for human consumption.
  - a. **Cold Only Units:** These units dispense cold water only. These units have a refrigeration cycle.
  - b. **Hot and Cold Units:** These units dispense both hot and cold water. Some units may have a third room-temperature tap. These units have both an electric resistance heater and a refrigeration cycle.
  - c. **Cook and Cold Units:** These units dispense both cold and room-temperature water. These units have a refrigeration cycle
- B. **Compartment-Type Bottled Water Cooler:** A bottled water cooler which, in addition to the primary function of cooling and dispensing potable water, includes a refrigerated compartment with or without provisions for making ice.
- C. **Standby Energy Consumption:** The required energy to maintain cold and/or hot water at appropriate dispensing temperatures with no water being withdrawn.

**2) Scope:**

- A. **Included Products:** Products that meet the definitions of a Water Cooler as specified herein are eligible for ENERGY STAR qualification, with the exception of products listed in Section 2.B. Both bottled (including compartment-type) and bottle-less water cooler types are covered under this specification. Bottle-less water coolers include Point-of-Use (POU) and air-source water generating units.
- B. **Excluded Products:** Units that provide pressurized water and are not free standing (i.e., wall mounted, under sink, or otherwise building integrated) are not eligible for ENERGY STAR.

**3) Qualification Criteria:**

A. Energy and Water Consumption Requirements:

Table 1: Energy-Efficiency Criteria for ENERGY STAR Qualified Water Coolers	
Water Cooler Category	Standby Energy Use Under Test Conditions
Cold only and cook and cold units	$\leq 0.16 \text{ kWh/day}$
Hot and cold units	$\leq 1.20 \text{ kWh/day}$

**B. Significant Digits and Rounding:**

- a. All calculations shall be carried out with actual measured or observed values. Only the final result of a calculation shall be rounded. Calculated results shall be rounded to the nearest significant digit as expressed in the corresponding specification limit.
- b. Unless otherwise specified, compliance with specification limits shall be evaluated using exact values without any benefit from rounding.

**4) Test Requirements:**

- A. Representative Models shall be selected for testing. The representative model shall be equivalent to that which is intended to be marketed and labeled as ENERGY STAR. Qualification based on product family is not acceptable under this specification. Each individual model shall be tested and meet the requirements of this specification to be qualified as ENERGY STAR.
- B. When testing water coolers, the following test methods shall be used to determine ENERGY STAR qualification:

<b>Table 2: Test Methods for ENERGY STAR Qualification</b>	
<b>ENERGY STAR Requirement</b>	<b>Test Method Reference</b>
Standby Energy Use	ENERGY STAR Test Method for Water Coolers, October 2010

- 5) **Effective Date:** The ENERGY STAR Water Cooler Specification shall take effect on **January 22, 2010**. To qualify for ENERGY STAR, a product model shall meet the ENERGY STAR specification in effect on the model's date of manufacture. The date of manufacture is specific to each unit and is the date (e.g., month and year) on which a unit is considered to be completely assembled.
- 6) **Future Specification Revisions:** EPA reserves the right to change the specification should technological and/or market changes affect its usefulness to consumers, industry, or the environment. In keeping with current policy, revisions to the specification are arrived at through industry discussions. In the event of a specification revision, please note that the ENERGY STAR qualification is not automatically granted for the life of a product model.



## ENERGY STAR® Program Requirements Product Specification for Water Coolers

### Test Method

#### 1) OVERVIEW

The following test method shall be used for determining product compliance with requirements in the ENERGY STAR Product Specification for Water Coolers.

#### 2) APPLICABILITY

This test protocol is applicable for the evaluation of standby power consumed by bottled and bottle-less water coolers.

#### 3) DEFINITIONS

Unless otherwise specified, all terms used in this document are consistent with the definitions contained in the ENERGY STAR Product Specification for Water Coolers.

#### 4) TEST CONDITIONS AND METHOD

Test conditions are described below. Tests shall focus on overall standby losses and water shall not be withdrawn during the testing procedure. Standby conditions under manufacturer control during the test period shall mimic conditions that the unit will experience during typical use. All temperature and other settings shall be the same as when the unit will be shipped.

- A. **Power Measurement:** Energy use shall be measured as the total true power (kilowatt-hours) consumed in one 24-hour period. The Wattmeter used to measure the power consumption shall have a minimum resolution of 1 Watt and precision +/- 2%.
- B. **Starting Conditions:** Before the power measurements are recorded, the unit shall be at operating conditions, with water temperatures as defined in item 4F, below.
- C. **Water Withdrawal:** No water may be withdrawn from the unit during the test.
- D. **Timer Usage:** If the unit has an integral, automatic timer, occupancy sensor, or other feature designed to reduce the number of hours during the day the unit is running, the unit shall be tested with these features enabled only if the unit is shipped with these features enabled.
- E. **Ambient Temperature:** Ambient air temperature shall be  $75^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{F}$  [ $23.8 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ ].
- F. **Dispensed Water Temperatures:** Cold water temperature shall not exceed  $50^{\circ}\text{F}$  [ $10.0^{\circ}\text{C}$ ] and hot water temperature shall be at least  $165^{\circ}\text{F}$  [ $73.9^{\circ}\text{C}$ ]. These temperatures shall be measured before conducting the standby energy use test described in this specification when the respective function, compressor, or heating element turns on. The unit shall not be turned off nor have any settings adjusted at any time during the test. The cold and hot water temperature settings used during the test shall be the default settings at which the unit is shipped. Units designed to provide hot or cold

water on demand, as opposed to maintaining a supply of hot or cold water, shall provide water meeting these temperature requirements within three minutes of a user calling for hot or cold water.

- G. **Cooler Location:** The unit shall be no more than 6 inches (152 mm) from a wall at least 7 feet (2,134 mm) high and extending horizontally at least 2 feet (610 mm) from each side of the unit.
- H. **Airflow:** Airflow around the unit shall be natural; no artificial means of increasing the airflow are permitted. Airflow created by components integral to the unit itself, such as internal fans, is permitted.
- I. **Compartment Temperature:** If the unit being tested is a compartment-type water cooler, during the test, there shall be no melting of ice, nor shall the average temperature exceed 46.0°F [7.8°C] in the refrigerated compartment<sup>1</sup>.
- J. **Dual-configuration Units:** Water coolers that can serve as both a bottled unit and a POU, depending on the configuration as shipped by the manufacturer, shall be tested in each configuration. That is, the unit shall be tested both in the bottled water configuration and the POU configuration, and have the results from both tests meet the ENERGY STAR Product Specification for Water Coolers.

<sup>1</sup> ARI 2002 Standard 1010 for Self-Contained Mechanically-Refrigerated Drinking-Water Coolers