



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

TESE DE DOUTORADO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL**

FRANCINALDO DE FREITAS PEREIRA

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL**

Francinaldo de Freitas Pereira

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Processos Químicos

ORIENTADORES:

Prof. Dr. Kepler Borges França

Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2005

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P436d Pereira, Francinaldo de Freitas
2006 Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível / Francinaldo de Freitas Pereira. — Campina Grande, UFCG, 2006.
119f. : il.

Referências.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Prof. Dr. Kepler Borges França e Prof. Dr. Hervé Michel Laborde.

1— Hidrogênio 2— Energia 3— Eletrólise I— Título

CDU 662.769.2

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL**

Tese Aprovada em 26/08/2005

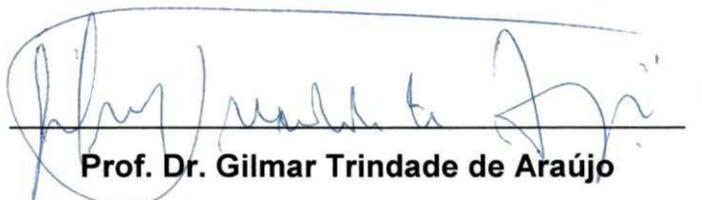
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr Kepler Borges França
Orientador (DEQ/UFCG)



Prof. Dr Hervé Michel Laborde
Orientador (DEQ/UFCG)



Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo
Examinador Interno (DEQ/EFCG)



Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira
Examinador Interno (DEMa/UFCG)



Prof. Dr Michel François Fossy
Examinador Interno (DEQ/EFCG)



Prof. Dr João Tavares Pinho
Examinador Externo (DEEC/UFGA)

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, João Pereira da Silva e Luiza de Freitas Pereiras, aos meus bravos irmãos e queridos sobrinhos Sabrina, Mateus e Gabriely.

AGRADECIMENTOS

A Deus criador do Céu e da Terra, pela luz que nos ilumina a cada amanhecer de um novo dia.

Aos amigos e orientadores professores Kepler Borges França e Hervé Michel Laborde, pela cumplicidade dedicação e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo, camarada e grande companheiro de trabalho Francisco Sérgio B. Gusmão pela colaboração, sugestões e discussões e também aos vários momentos de lazer por nós vividos.

A Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processos na pessoa da coordenadora Odelsia Leonor Sanchez de Alsina pela dedicação de corpo e alma ao aprimoramento e desenvolvimento do Doutorado, e a secretária Fátima pela a atenção e o seu jeito simples de ser.

Ao Departamento de Eng. de Materiais pelo fornecimento das argilas e por ceder as instalações de seu laboratório para realização dos ensaios tecnológicos de caracterização dos corpos de prova.

A Vilma Maria Sudério pela valiosa parceria de amizade e desenvolvimento desta pesquisa.

A Reginaldo Severo de Macedo pelo fornecimento das placas prensadas.

A CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado.

A coordenação do LABDES por fornecer toda a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários e amigos que compõem o LABDES, pela contribuição de alguma forma a este trabalho e aos vários momentos de risos e relaxamento. Aqui não os nomearei para não cometer nenhuma falta e deslize.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL

Francinaldo de Freitas Pereira

O objetivo deste trabalho é estudar o desempenho de um forno tipo mufla adaptado para utilizar hidrogênio eletrolítico como combustível. O sistema de aquecimento poderá ser aplicado em fornos de produção de tijolos, telhas, materiais cerâmicos, e produtos derivados do trigo. Neste sentido o hidrogênio eletrolítico substituiria os combustíveis de origem orgânica, que são os grandes vetores da poluição atmosférica, o hidrogênio poderá ser produzido usando-se energias renováveis como painéis fotovoltaicos e/ou turbinas eólicas. O hidrogênio foi produzido a partir da eletrolise da água em um reator bipolar usando hidróxido de potássio como eletrólito. O consumo de energia e a produção de hidrogênio foram estimados para diferentes níveis temperaturas de 300°C, 900°C e, 1100°C.

Palavras-chave: Hidrogênio, Energia, Eletrólise

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A SYSTEM OF HEATING FOR COOKING USING HYDROGEN ELECTROLYTIC AS FUEL

by

Francinaldo de Freitas Pereira

The objective of this work is the study of an oven adapted to use electrolytic hydrogen as fuel. The possible applications are the cooking of clay used in the production of ceramic materials, bricks and tiles; as well as the production of derived products of the wheat. The electrolytic hydrogen, used as a fuel in replacement of carbonaceous fuels which contribute to the atmospheric pollution, can be produced using renewable energies like photovoltaic solar panels and/or aeolian turbine power generators. The hydrogen production is done by electrolysis of water which occurs in a bipolar reactor using potassium hydroxide as electrolyte. The energy consumption and the hydrogen production are calculated for different temperatures of 300°C, 900°C and 1100°C range. They are respectively, 0,9 kWh and 0,131 m³, 2,1 kWh and 0,311 m³ and 3,2 kWh and 0,498 m³.

Keywords: Hydrogen, Energy, Electrolysis

SUMÁRIO

1.0 – INTRODUÇÃO.....	01
1.2 – Objetivos.....	03
1.2.1 – Objetivo Geral.....	03
1.2.2 – Objetivo Específico.....	03
2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	04
2.1 – O Hidrogênio.....	04
2.1.1 – Propriedades Físicas e Químicas do Hidrogênio.....	05
2.1.2 – Perspectiva Energética do Hidrogênio.....	06
2.1.3 – Processos de Obtenção do Hidrogênio.....	10
2.1.4 – Custo do Hidrogênio.....	13
2.1.5 – A Eletrólise.....	14
2.1.5.1 – A Eletrólise da Água.....	14
2.1.5.2 – Reações na Eletrólise da Água.....	16
2.1.6 – Tensão na Célula Eletrolítica.....	19
2.1.6.1 – Sobretensões.....	21
2.1.7 – Densidade de Corrente.....	24
2.1.8 – Curvas de Polarização.....	25
2.1.9 – Efeito da Temperatura e da Pressão.....	26
2.1.10 – Componentes Básicos de uma Célula Eletrolítica.....	28
2.1.11 – Tipos Básicos de Eletrolisadores.....	30
2.1.11.1 – Eletrolisadores Convencionais.....	30
2.1.11.2 – Eletrolisadores Avançados.....	33
2.2 – Argilas.....	35
2.2.1 – Placas Cerâmicas para Revestimento.....	35

2.2.2 – Caracterização de Argilas para Uso em Cerâmica Vermelha....	37
3.0 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 – Materiais.....	38
3.1.1 – Sistema Eletrolítico (Eletrolisador Bipolar).....	39
3.1.1.1 - Principais Componentes do Sistema eletrolítico.....	41
3.1.2. – Sistema de Aquecimento (forno).....	44
3.2. Métodos.....	45
3.2.1 – Instalação dos Sistemas (eletrolisador e forno).....	45
3.2.2 – Operação com os Sistemas Eletrolítico e de Aquecimento.....	46
3.3 - Ensaios Tecnológicos.....	47
4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 – Avaliação da Primeira Versão do Sistema de Aquecimento.....	50
4.2 – Avaliação da Segunda Versão do Sistema de Aquecimento.....	51
4.2.1 – Cálculo do Consumo de Hidrogênio.....	54
4.3 – Avaliação da Terceira Versão do Sistema de Aquecimento.....	56
4.3.1 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Cerâmicas.....	58
4.3.1.1 – Linhas de Tendências para os Perfis de Temperatura, Consumo de Energia e Consumo de Hidrogênio.....	68
4.3.1.2 – Caracterização da Argila para Aplicação em Revestimento Cerâmico.....	81
4.3.2 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Olaria.....	85
4.3.2.1 – Caracterização da Argila para Aplicação em Cerâmica Vermelha.....	93
4.3.3 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Padaria...	95
4.4 – Ilustrações do Sistema de Aquecimento.....	97
4.5 – Custo Estimativo de Geração do Hidrogênio	100
5.0 – CONCLUSÃO.....	103

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXO.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Sistema Global de Transição Energética	08
Figura 2.2	Ciclo Renovável do Hidrogênio.....	09
Figura 2.3	Produção de Hidrogênio Obtido de Várias Fontes	12
Figura 2.4	Sistema Energético do Hidrogênio.....	13
Figura 2.5	Diagrama dos Processos de Eletrolise da Água.....	15
Figura 2.6	Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água.....	20
Figura 2.7	Curvas típicas de voltagem versus densidade de corrente para células eletrolíticas	25
Figura 2.8	Esquema de Arranjo de Eletrolisador Unipolar.....	33
Figura 2.9	Esquema de Arranjo de Eletrolisador Bipolar.....	33
Figura 2.10	Esquema de um Eletrolisado Avançado (PEM).....	34
Figura 3.1	Fluxograma do Processo Eletrolítico.....	40
Figura 3.2	Reator Eletrolítico.....	41
Figura 3.3	Reservatório de Eletrólito e Sistema de Refrigeração.....	42
Figura 3.4	Selo Controlador de Chama.....	43
Figura 4.1	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), de saída da chaminé (TSC) e parede externa (TPE) da <i>primeira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°.....	51
Figura 4.2	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), de saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e consumo de energia (E) da <i>segunda versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C.....	52
Figura 4.3	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>segunda versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C.....	53

Figura 4.4	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>segunda versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C.....	54
Figura 4.5	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C.....	59
Figura 4.6	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C.....	59
Figura 4.7	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C.....	60
Figura 4.8	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C.....	60
Figura 4.9	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C.....	61
Figura 4.10	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C.....	62
Figura 4.11	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira</i>	

	<i>versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C.....	62
Figura 4.12	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C.....	63
Figura 4.13	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C.....	64
Figura 4.14	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C.....	64
Figura 4.15	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C.....	65
Figura 4.16	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da <i>terceira versão</i> do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C.....	65
Figura 4.17	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) durante o resfriamento (segunda versão).....	67
Figura 4.18	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) durante o resfriamento (terceira versão).....	67
Figura 4.19	Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1150°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de	

aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	69
Figura 4.20 Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1150°C), da segunda fase da terceira versão do sistema de aquecimento com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	69
Figura 4.21 Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1100°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	70
Figura 4.22 Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1100°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	71
Figura 4.23 Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1050°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	71
Figura 4.24 Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1050°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.....	72
Figura 4.25 Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1150°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	73
Figura 4.26 Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1150°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	73

Figura 4.27	Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1100°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	74
Figura 4.28	Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1100°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	75
Figura 4.29	Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1050°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	75
Figura 4.30	Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1050°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.....	76
Figura 4.31	Perfis de temperatura da parede externa para (TIF = 1150°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TPEM) e sua respectiva linha de tendência.....	77
Figura 4.32	Perfis de temperatura da parede externa para (TIF = 1150°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TPEM) e sua respectiva linha de tendência.....	77
Figura 4.33	Perfis dos consumos de energia (E) da terceira versão do sistema de aquecimento para (TIF) de 1150°C, 1100°C e 1050°C.....	78
Figura 4.34	Perfis dos consumos de hidrogênio da terceira versão do sistema de aquecimento (H ₂) para (TIF) de 1150°C, 1100°C e 1050°C.....	79

Figura 4.35	Comportamento do desenvolvimento do perfil do consumo de energia da fase de pré-aquecimento do forno para (TIF) de 1150°C.....	80
Figura 4.36	Comportamento do desenvolvimento do perfil do consumo de energia da segunda fase de aquecimento do forno para (TIF) de 1150°C.....	80
Figura 4.37	Ilustração dos corpos de prova antes do processo de queima.....	82
Figura 4.38	Peças Queimadas a 1150°C.....	83
Figura 4.39	Peças Queimadas a 1100°C.....	83
Figura 4.40	Peças Queimadas a 1050°C.....	83
Figura 4.41	Peças Queimadas a 1200°C.....	84
Figura 4.42	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da terceira versão do sistema, aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C) tempo final 45 minutos.....	86
Figura 4.43	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da terceira versão do sistema, aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C) final 60 minutos.....	86
Figura 4.44	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (fase de pré-aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C), tempo final 45 minutos.....	87
Figura 4.45	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (segunda fase de aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C) tempo final 45 minutos.....	88

Figura 4.46	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (fase de pré-aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C), tempo final 60 minutos.....	89
Figura 4.47	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (segunda fase de aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C) tempo final 60 minutos.....	90
Figura 4.48	Perfis do consumo de energia para TIF 900°C.....	91
Figura 4.49	Perfis do consumo de hidrogênio para TIF 900°C.....	91
Figura 4.50	Perfil da linha de tendência do consumo de energia para primeira fase de aquecimento, correspondente a TIF de 900°C.....	92
Figura 4.51	Perfil da linha de tendência do consumo de energia para segunda fase de aquecimento, correspondente a TIF de 900°C.....	93
Figura 4.52	Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E).....	96
Figura 4.53	Foto ilustrativa do sistema para aplicação em padarias.....	97
Figura 4.54	Ponto de alimentação do sistema.....	98
Figura 4.55	Foto ilustrativa do sistema para aplicação na indústria cerâmica e de olarias.....	99
Figura 4.56	Coleta do vapor de água na saída da chaminé.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Poder Calorífico Inferior dos Principais Combustíveis.....	10
Tabela 2.2	Sumário dos Principais Processos de Geração de Hidrogênio	11
Tabela 2.3	Custo do Hidrogênio nos EUA.....	14
Tabela 2.4	Classificação de Revestimentos Cerâmicos.....	36
Tabela 2.5	Classificação em Relação ao MRF e Abs.....	37
Tabela 2.6	Característica Cerâmica para Argila Vermelha após Queima	37
Tabela 4.1	Consumo de Hidrogênio e Energia Segunda Versão do Sistema.....	55
Tabela 4.2	Consumo de Hidrogênio e Energia Terceira Versão do Sistema.....	56
Tabela 4.3	Comparação das Três Versões do Sistema de Aquecimento.	57
Tabela 4.4	Análise do Perfil de Resfriamento.....	66
Tabela 4.5	Caracterização da argila para revestimento cerâmico.....	81
Tabela 4.6	Consumo de Hidrogênio e Energia.....	93
Tabela 4.7	Caracterização da argila para cerâmica vermelha.....	94
Tabela 4.8	Consumo de Hidrogênio e Energia.....	96
Tabela 4.9	Custo de Produção do Sistema Híbrido.....	101
Tabela 4.10	Custo de Produção via Energia Convencional.....	102

SIMBOLOGIA

- A – Área da célula eletrolítica
Abs – Absorção de água
CES – Custo via energia solar
CESB – Custo via energia solar e bateria
CSC – Custo via energia convencional
E – Consumo de energia durante o experimento
E₁ – Voltagem mínima para eletrólise
E₂ – Voltagem termoneutra para eletrólise
F – Constante de Faraday
H – Símbolo do elemento químico do hidrogênio
H₂ – Símbolo do hidrogênio molecular
I – Corrente
J – Densidade de corrente
MEA – Massa específica aparente
MRF – Módulo de resistência a flexão
N – Condições normais de temperatura e pressão
n – Número de elétrons transferido na reação
O₂ – Símbolo do oxigênio molecular
PA – Porosidade aparente
PF – Perda ao fogo
P' – Pressão inicial dos gases
P'' – Pressão final dos gases
Q – Carga transferida à reação
R – Constante dos gases
R² – Fator de correlação
RL – Retração linear de queima
R_G – Taxa de geração de hidrogênio

T – Temperatura

TIF – Temperatura interna do forno

TSC – Temperatura de saída da chaminé

TPE – Temperatura da parede externa do forno

TIFM – Perfil médio da temperatura interna do forno

TSCM – Perfil médio da temperatura de saída da chaminé

TPEM – Perfil médio da temperatura da parede externa do forno

V – Voltagem real ou de operação de cada par da célula eletrolítica

ΔG – Variação da energia livre de Guibbs da reação

ΔG – Variação da entalpia da reação

ΔE – Variação da voltagem da célula

η_{total} – Sobretensão total da célula eletrolítica

η_a – Sobretensão anódica

η_c – Sobretensão catódica

η – Eficiência da célula eletrolítica

1.0 - INTRODUÇÃO

“Temos gasolina para queimar à vontade ao longo de todo o século XXI. Mas, se fizermos isso, também vamos queimar o planeta.”, comenta o escritor e pesquisador americano Mark Hertsgaard, da Universidade Johns Hopkins. “

“Água, sim, meus amigos, eu acredito que a água será usada como combustível pelo hidrogênio e oxigênio que possui, e estes, usados sozinhos ou juntos, nos fornecerão inesgotável fonte de calor e luz...”, Jules Verne.

Dois cientistas e escritores vivendo em épocas deferentes, mas, com a mesma preocupação de como conduzir o nosso planeta ao longo dos tempos numa engrenagem energética, que possibilite um crescimento tecnológico e inteligentemente viável, de tal forma, que se consiga projetar o homem a viver numa atmosfera terrestre limpa e ecologicamente correta. Ponto de vista este, defendido hoje, por vários pesquisadores, que vislumbram o desenvolvimento e domínio de novas tecnologias energéticas que viriam a substituir progressivamente as atuais provenientes de fontes poluentes e não renováveis.

Neste preâmbulo, dois fatores são preponderantes para implementação de uma nova matriz energética. Um seria o fim dos combustíveis fósseis, pois os mesmos são provenientes de fontes não renováveis e seu amplo consumo, tende à rápida diminuição de suas reservas mundiais. Outro fator, que hoje se mostra o de maior importância, é a crescente conscientização ecológica mundial inerente à poluição atmosférica, que poderá tornar a vida nas grandes metrópoles praticamente inviável. Neste aspecto, pesquisadores estão desenvolvendo novas técnicas visando à integração de fontes de energias renováveis e não poluentes, como a energia do hidrogênio, energia solar e energia eólica, entre outras, para aplicação como combustíveis em vários tipos de processos.

No momento, entre várias alternativas energéticas, a que se apresenta mais promissora é, sem dúvida, a fundamentada no vetor energético do hidrogênio, pois este, além de ser o combustível de maior poder calorífico, é o elemento mais abundante no universo e proveniente de fontes inesgotáveis,

podendo inclusive ser obtido da água do mar. Outro elemento caracterizador e de forte impacto positivo, reside no fato de que após a combustão daquele elemento, tem-se como produto apenas água na forma de vapor. Desta forma, não haverá, a grande preocupação de estar poluindo o meio ambiente.

Um dos grandes desafios no decorrer deste século será desenvolver e dominar novas tecnologias energéticas de fontes renováveis e menos poluentes, em contraposição com a diminuição do consumo de fontes não renováveis (petróleo, carvão, gás natural, etc.), que são os grandes vetores de geração da poluição. No ano de 2000 o consumo mundial de energia primária proveniente de fontes renováveis, correspondia a 13,8% do total, cabendo 86,2% às fontes não renováveis. Já no Brasil, 41% a Oferta Interna de Energia (OIE) é proveniente de fonte renovável, devido à alta participação da geração hidráulica (BEN, 2003).

A motivação para o desenvolvimento desta tese está fundamentada nos fatores anteriormente apresentados, sendo impulsionada pela necessidade de se desenvolver um sistema de aquecimento – FORNO – que substitua e tenha as mesmas aplicações dos fornos convencionais que utilizam combustíveis fósseis. Neste sentido, o grupo do hidrogênio do Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), ligado ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), vem há mais de dez anos desenvolvendo pesquisas nesta área. Desta forma, pretende-se alcançar o domínio e a aplicação desta técnica em processos que contribuam para a solução energética do planeta em um futuro próximo.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de aquecimento (forno) que utiliza hidrogênio eletrolítico como combustível alternativo em substituição aos combustíveis convencionais.

1.2.2 – Objetivo Específico

Avaliar o sistema de aquecimento para processos de queima em níveis de baixa, média e alta temperaturas, que compreendem respectivamente as faixas de temperaturas de 200 – 300 °C, 800 – 900 °C e 1.050 – 1.150 °C. Estes níveis de temperaturas são estudados para aplicações em fornos de padaria, olaria e cerâmica, dando-se maior ênfase para processos de queima utilizados em fornos da indústria cerâmica.

2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – O Hidrogênio

A descoberta do hidrogênio se deve a Theophrastus Bombastus von Hohenheim (Paracelsus), em 1500. Foi recolhido e isolado por Cavendish em 1766, recebendo de Lavoisier o nome definitivo de hidrogênio (hidro = água, genes = forma; formador da água) (SILVA 1991). Apresenta-se sob a forma gasosa, inodora, insípida, e não tóxico à temperatura ambiente; ou líquido, abaixo de -253°C , à pressão normal, o que indica ser de difícil liquefação. Seu valor energético à pressão constante é de 28.663 kcal/kg contra um valor médio de 10.000 kcal/kg para os derivados de petróleo. O hidrogênio apresenta a particularidade de se aquecer ao sofrer uma rápida expansão. Em função deste fato, vazamento deste gás oferece maiores condições de riscos de incêndios. Porém, o hidrogênio, como qualquer outro combustível gasoso se tomadas as necessárias medidas de segurança, não tem seu fator de risco potencializado. Ao contrário, este elemento, que possui massa específica cerca de 6000 vezes menor que o GLP, em caso de vazamento, se dissipará na atmosfera com maior rapidez em relação aos derivados do petróleo.

Muitas estrelas, cometas e planetas são feitas de hidrogênio ou contêm grandes percentagens desse elemento. O hidrogênio quando coletado por forças gravitacionais pelas estrelas é convertido em hélio, por fusão nuclear, sendo esta conversão a fonte da energia solar e de todas as estrelas. O planeta Júpiter é constituído de hidrogênio sólido, líquido e gasoso. Combinado com outros elementos, o hidrogênio é o terceiro elemento mais abundante na Terra (após o oxigênio e o silício); é o primeiro no Universo, onde se estima perfazer 90% dos átomos existentes (SILVA, 1991).

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia, não sendo encontrado em minas ou jazidas, nem produzido, pelo menos em grandes quantidades, através de processos naturais e espontâneos. Por outro lado, pode ser gerado, por meio de um grande número de processos artificiais envolvendo diversas fontes primárias, tais como: carvão, petróleo, energia solar, eólica, nuclear, etc. (Pereira, 1999).

2.1.1 – Propriedades Físicas e Químicas do Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais abundante no Universo e também o mais leve, sendo também o primeiro elemento da tabela periódica de Mendeleev, possuindo o símbolo químico **H**, número atômico 1, peso atômico 1,00797 e massa atômica 2,01594 g/mol; é formado por um próton e um elétron, possui dois outros isótopos, o deutério, de massa 2, e o trítio, de massa 3, valência 1 e estrutura cristalina cúbica. Seu átomo possui um potencial de eletro-ionização de 13,54 volts (PERRY e CHILTON 1986).

Como substância, apresenta-se na forma de moléculas diatômicas. É a mais leve de todas as substâncias conhecidas, possuindo uma densidade de 0,08987 g/L (0 °C e 1 atm) e 0,07 em relação ao ar. É pouco solúvel na água (0,0214 volumes/volumes de água a 0 °C), apresentando maior solubilidade em solventes orgânicos (0,078 volumes/volumes de etanol a 25 °C). Depois do hélio, é o que apresenta maior dificuldade para ser liquefeito; em temperaturas ordinárias ou baixas pressões aproxima-se bastante de um gás ideal. Apresenta viscosidade menor que o ar e condutividade térmica sete vezes maior (PERRY e CHILTON, 1986).

O hidrogênio queima na presença do ar com uma chama azul muito pálida, quase invisível. As temperaturas de ignição de mistura hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio variam de acordo com a composição, pressão, umidade e temperatura inicial. À pressão atmosférica a temperatura de ignição dessas misturas encontra-se na faixa de 565 a 579 °C (AMORIM,

1995). Os limites de inflamabilidade de misturas hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio dependem da pressão e temperatura iniciais e da umidade. Em ar seco e à pressão atmosférica, o limite inferior é 4,1% de hidrogênio e o superior 74% de hidrogênio em volume. Em oxigênio seco e à pressão atmosférica o limite inferior é 4,7% de hidrogênio e o superior 93,9% em volume de hidrogênio. Contrariamente a muitos gases comuns, tais como, O₂, N₂, e CO₂, o hidrogênio aquece se sua expansão for muito rápida (Pereira, 1999).

Quimicamente o hidrogênio é pouco reativo a frio, tornando-se bastante reativo a quente, na presença de catalisadores. Na sua forma molecular apresenta-se como um forte agente redutor, mesmo em temperaturas ordinárias, reagindo com óxidos e cloretos de metais. Como maior constituinte dos compostos orgânicos, realiza com estes um grande número de reações, sendo particularmente importante as de craqueamento de compostos orgânicos, de redução de compostos insaturados e de hidrogenação. O hidrogênio na sua forma molecular, dissocia-se a altas temperaturas em átomos livres, cujo calor de dissociação é de 435,97 kJ/mol a 25 °C (SILVA, 1991). A reação é representada por:



2.1.2 – Perspectiva Energética do Hidrogênio

Dois fatores principais nortearam, no cenário mundial, o hidrogênio como um dos principais vetores energéticos que possibilitasse o desenvolvimento de novas tecnologias de fontes renováveis, inesgotáveis e ecologicamente limpas. O primeiro fator se deu após a crise do petróleo, em 1973, onde o hidrogênio foi eleito como um dos principais combustíveis que poderia gradualmente substituir a matriz energética do petróleo (MORMIRLAN e VEZIROGLU, 2002). O segundo fator, sendo hoje o de maior importância,

reside na crescente conscientização ecológica das nações preocupadas em evitar um desastre mundial do meio ambiente, provocado pela queima dos combustíveis de origem fóssil, que torna o ar dos grandes centros urbanos cada vez mais difícil de se respirar (BOCKRIS, 2002).

No cenário mundial, o hidrogênio vem sendo considerado o combustível do futuro; conseqüentemente, isto tem efeito direto no desenvolvimento de diferentes tecnologias, baseadas no uso do hidrogênio, em substituição aos combustíveis fósseis. Isso se deve as seguintes razões (BAK, et al., 2002):

- O uso de combustível fóssil é responsável pela mudança do clima;
- As reservas dos combustíveis fósseis são limitadas;
- Os preços dos combustíveis fósseis estão em constante elevação;
- A necessidade de geração de combustíveis cujas fontes são abundantes e disponíveis;
- A necessidade do uso de combustíveis que ajude a preservar o meio ambiente e não a destruí-lo.

Em meados dos anos 80 foi elaborada a concepção geral de como se deveria desenvolver a estrutura tecnológica da energia fundamentada no hidrogênio. Neste momento, estabeleceu-se uma análise criteriosa de como se deveria desenvolver essa nova potencialidade energética. Basicamente foram abordados quatro pontos: (1) o hidrogênio poderia ser produzido a partir da água, usando energias não renováveis como (carvão, energia atômica e termonuclear) e energia renováveis como (solar, eólica, hídrica, marés, biomassa, etc.), (2) distribuição, transporte e estocagem do hidrogênio, (3) utilização do hidrogênio na indústria, transporte (terrestre, aéreo e marítimo) e em residências, e (4) desenvolvimento de tecnologias seguras (GOLTISOV e VEZIROGLU, 2001).

Neste contexto, o hidrogênio substituiria progressivamente a matriz energética fundamentada nos combustíveis fósseis, os quais são obtidos de fontes não renováveis, logo esgotáveis, tendo esses sistemas o grande

agravante da propriedade de emitirem para a atmosfera substâncias tóxicas como (CO , CO_2 , C_nH_m , SO_x , NO_x , metais pesados, etc.) (MORMIRLAN e VEZIROGLU, 2002).

A Figura 2.1 mostra historicamente a porcentagem da utilização dos combustíveis desde o ano de 1850, bem como a projeção energética até o ano de 2150, onde se observa o declínio das fontes energéticas sólidas e líquidas e a ascensão das fontes gasosas, sendo projetado o completo domínio da tecnologia do hidrogênio no fim deste período (HEFNER III, 2002).

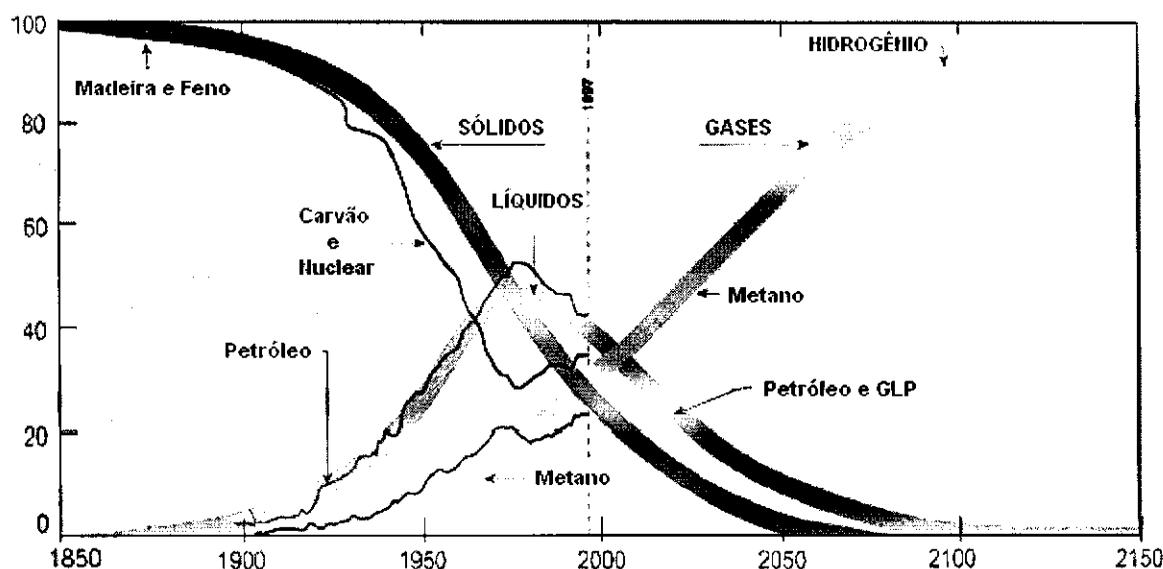


Figura 2.1 – Sistema Global de Transição Energética

A eletrólise da água, a partir de fontes renováveis de energia resulta no desenvolvimento de um ciclo ecológico de geração do hidrogênio, obtendo-se desta forma um combustível de alta concentração energética e de fontes inesgotáveis. A ideia da obtenção do hidrogênio a partir de fontes renováveis fundamenta a base econômica desta tecnologia, já que se possibilitaria a estocagem e o transporte em larga escala de energias renováveis (BOCKRIS, 2002). A Figura 2.2 mostra o ciclo renovável do hidrogênio, que pode ser obtido das fontes de energias solar e eólica, processos estes já desenvolvidos na década passada em vários países tais

como, Finlândia, Alemanha, Itália, Arábia Saudita, Espanha, Suíça e Estados Unidos (DUNN, 2002).

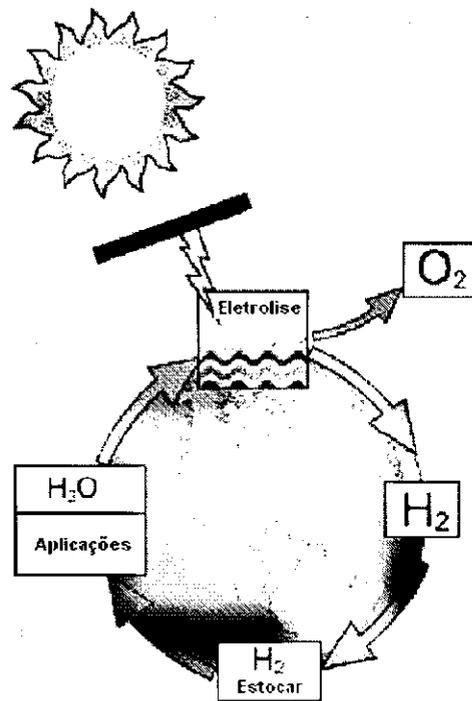


Figura 2.2 – Ciclo Renovável do Hidrogênio

O hidrogênio por possuir poder calorífico superior aos combustíveis atualmente utilizados na matriz energética mundial, se comparado com estes, necessitaria de uma quantidade em massa consideravelmente menor do que a consumida nos atuais processos em que se utiliza qualquer outra forma de combustível. A Tabela 2.1 apresenta o poder calorífico dos principais combustíveis.

Tabela 2.1 – Poder Calorífico Inferior dos Principais Combustíveis

Fontes de Energia	Poder Calorífico (kcal/kg)
Petróleo	10.180
Óleo diesel	9.590
Gasolina Automotiva	10.400
Álcool Etilico	6.750
Querosene	10.400
GLP	11.100
Gás natural	9.930
Carvão vegetal	6.460
Bagaço de cana	2.130
Lenha	3.100
HIDROGÊNIO	28.663 (Fiché N° 2.1)

Fonte, BEN 2003

2.1.3 – Processos de Obtenção do Hidrogênio

Existem vários processos para se gerar o hidrogênio, nos quais o mesmo pode ser o foco principal do processo ou apenas um dos produtos resultantes. A opção para se utilizar um determinado processo depende de alguns fatores, tais como (MOURA, 1980):

- Volume de hidrogênio a ser produzido;
- Usos do hidrogênio;
- Natureza das plantas e equipamentos;
- Pureza do hidrogênio.

Dentre esses processos, dois grupos podem ser distinguidos: aqueles em que o hidrogênio é o principal (ou um dos principais) produto resultante, e aqueles em que o hidrogênio é apenas um subproduto do processo em que, mesmo sendo aproveitado, não é o objetivo prioritário.

Exemplos: na indústria de álcalis, principalmente na produção de soda cáustica, na petroquímica, em diversos processos, (principalmente na produção de benzeno, tolueno e xileno). Os processos em que o hidrogênio é um produto desejado, ou seja, os métodos de geração do hidrogênio propriamente dito, podem ser separados em dois grupos: os convencionais, com tecnologias consolidadas, e os avançados, cujas tecnologias ainda se encontram em desenvolvimento (PEREIRA, 2000). A Tabela 2.2 apresenta os principais processos de geração de hidrogênio.

Tabela 2.2 – Sumário dos Principais Processos de Geração de Hidrogênio (MORMIRLAN e VEZIROGLU, 2002).

Processos
Eletrólise da água
Gaseificação do carvão
Reforma-vapor de hidrocarbonetos leves
Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados
Reforma do metanol e do etanol
Processos Foto-Químico
Processos Foto-Biológico
Decomposição térmica da água

A Figura 2.3, representa o fluxograma de diversos métodos possíveis de geração do hidrogênio, onde se destacam os processos de tecnologias de fontes renováveis e não convencionais (solar, eólica e biomassa), em contraposição aos processos convencionais de fontes não renováveis.

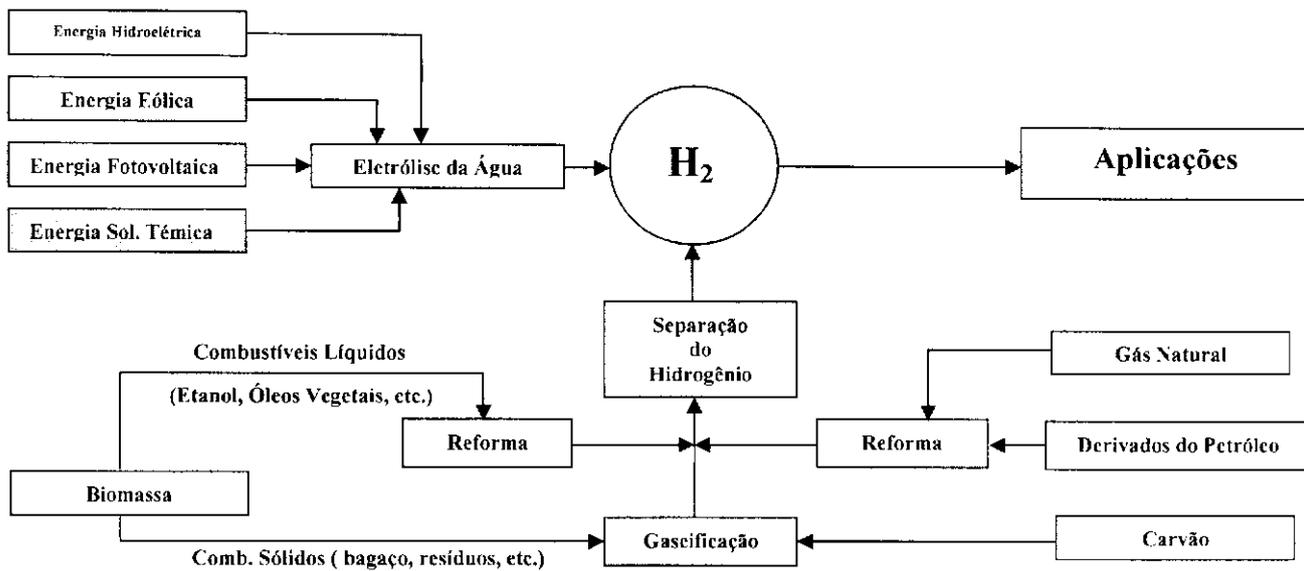


Figura 2.3 – Produção de Hidrogênio Obtido de Várias Fontes
(SILVA e CAMARGO, 2002)

O desenvolvimento mundial de processos fundamentados na tecnologia energética do hidrogênio, usando fontes de energias renováveis e ecologicamente limpas, envolve vários aspectos a serem desenvolvidos. Estes processos devem abordar caminhos econômicos de produção, transporte, estocagem e utilização do hidrogênio (DUNN, 2002). Em termos gerais, o ponto culminante do hidrogênio deve ser encerrado na sua utilização como combustível em todos os setores da sociedade, que vai do seu uso em residências até aplicações na indústria. A Figura 2.4 mostra, em aspectos gerais, como deve estar estruturado o sistema energético do hidrogênio, onde se observa sua obtenção a partir de várias fontes primárias até sua utilização final.

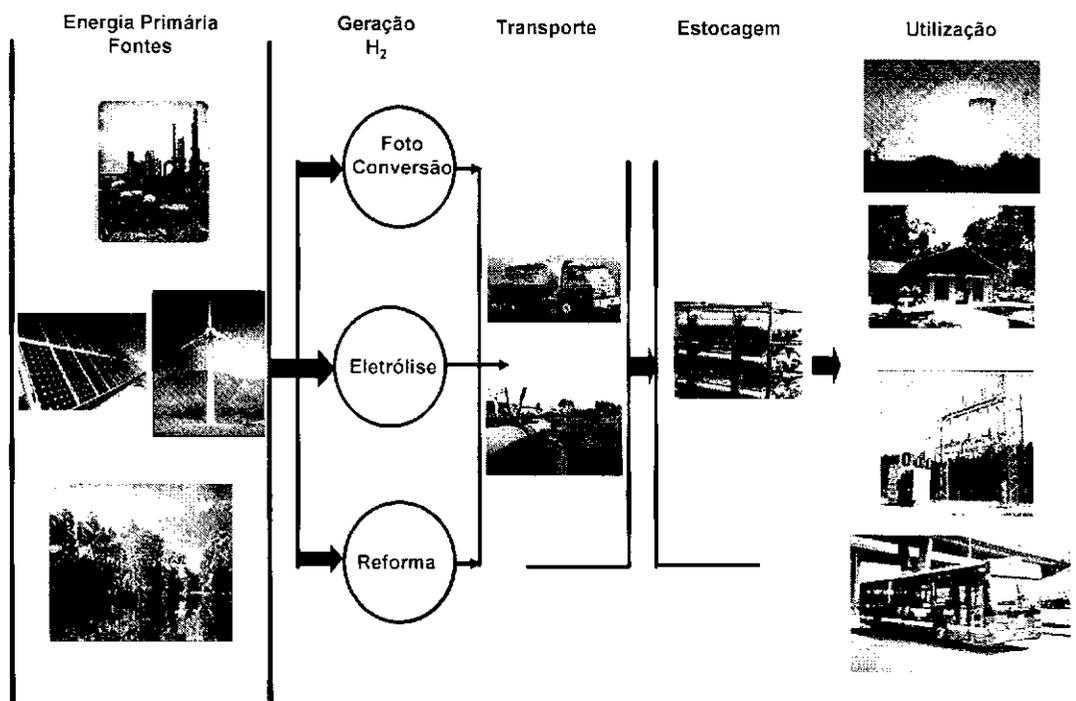


Figura 2.4 – Sistema Energético do Hidrogênio
(DUNN, 2002)

2.1.4 – Custo do Hidrogênio

O custo de produção do hidrogênio está intrinsecamente relacionado com o tipo de tecnologia utilizada para se gerar este elemento, sejam elas de fontes renováveis como, solar e eólica, reforma de combustível fóssil ou a própria eletrólise da água, utilizando-se energia elétrica convencional. Estudos realizados revelam que para o momento atual, os custos de produção e aplicação da tecnologia do hidrogênio nos diversos setores da sociedade são maiores se comparados com combustíveis de tecnologia já consolidada. Porém o aperfeiçoamento da tecnologia do hidrogênio combinado com alguns fatores, tais como: o caráter ecológico do hidrogênio, o grande potencial de poluição dos combustíveis fósseis e o declínio de suas reservas

mundiais, denotam que esta tecnologia se tornará mais viável, tanto no aspecto econômico quanto no ecológico, do que as tecnologias atualmente utilizadas.

Nos Estados Unidos o hidrogênio produzido via eletrólise da água a partir de fonte elétrica convencional, eólica e fotovoltaica apresenta os seguintes custos:

Tabela 2.3 – Custo do Hidrogênio nos EUA

Fonte Elétrica	Custo (\$)/m ³	Tempo
Convencional (hídrica)	0,54 – 0,63	hoje
	0,36	futuro (2020)
Eólica	0,63 – 0,99	hoje
	0,27	futuro (2020)
Fotovoltaica	0,90 – 2,70	hoje
	0,27 – 0,36	futuro (2020)

Fonte (Lipman, 2004)

2.1.5 – A Eletrólise

A eletrólise é uma reação de decomposição de substâncias por efeito de uma corrente elétrica. Tal reação se processa a temperatura e pressão constantes em um reator denominado célula eletrolítica. Esta é uma reação “forçada”, pois só se realiza mediante o consumo de trabalho elétrico útil, que é então armazenado na forma de energia livre de Gibbs (PILLA, 1980).

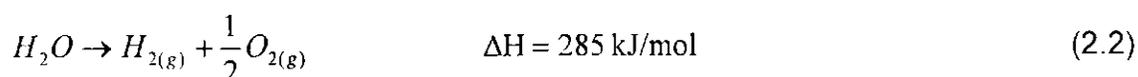
2.1.5.1 – A Eletrólise da Água

Em 1800, Nicholson e Carlisle produziram pela primeira vez o hidrogênio a partir da eletrólise da água. Todavia o primeiro eletrolisador de

água comercial só foi instalado em 1902 pela Oerlikon Engineering Company. Um grande eletrolisador foi instalado na Noruega, em 1927. Esta planta produzia originalmente menos que 10.000 m³/h, e foi aumentada em 1965 para a capacidade de 90.000 m³/h (COX e WILLIAMSON, 1977).

O processo pelo qual a água é decomposta pela passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos em contato com um meio eletrolítico, é denominado eletrólise da água (BOCKRIS e CONWAY, 1975). Em geral, o fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, através de um meio condutor iônico, que pode ser uma solução aquosa de ácido ou base, uma membrana polimérica ou uma membrana cerâmica condutora de ions O²⁻ (Memento de L'Hydrogène, 2002).

Um processo eletrolítico particular, que utiliza eletrodos inertes e meio condutor ácido ou básico, aquoso, em que os produtos das reações desenvolvidas são apenas o hidrogênio e o oxigênio, ou seja, cujo balanço das reações químicas resulta unicamente na decomposição da água, é denominado eletrólise da água. Existem vários sistemas onde a eletrólise da água pode ser desenvolvida, diferenciando-se entre si, basicamente, através do tipo de condutor iônico utilizado. De qualquer forma, em todos eles a reação final é a decomposição da água em seus elementos constituintes. Para destruir uma ligação química é necessária uma energia, cujo valor geralmente se encontra no intervalo de 125,5 a 836,8 kJ/mol. Na decomposição da molécula da água há uma absorção de 285 kJ/mol (Memento de L'Hydrogène, 2003)



O esquema geral do processo é mostrado na Figura 2.5

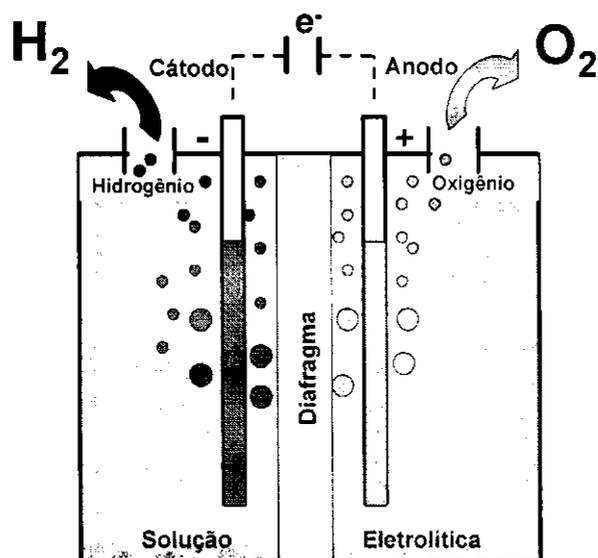


Figura 2.5 – Diagrama dos Processos de Eletrólise da Água

2.1.5.2 – Reações na Eletrólise da Água

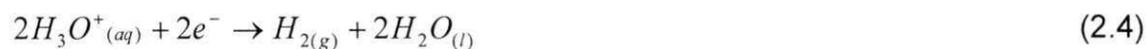
Em qualquer solução aquosa, ocorre auto ionização da água fazendo com que sempre exista a presença dos íons H_3O^+ e OH^- , segundo o equilíbrio a seguir:



O hidrogênio eletrolítico é gerado a partir de uma diferença de potencial nos eletrodos, gerando assim um campo elétrico no meio eletrolítico, produzindo um fluxo iônico direcionado; os íons de carga positiva se dirigem para o cátodo e os de carga negativa para o ânodo. Para ocorrerem as reações nos eletrodos faz-se necessário atingir o potencial mínimo de eletrólise (SILVA, 1991). Para os eletrólitos ácido, neutro ou alcalino, as reações eletródicas são as seguintes:

1) Reações Catódicas

a) Em eletrólito ácido



b) Em eletrólito neutro ou alcalino



2) Reações Anódicas

a) Em eletrólito ácido e neutro



b) Em eletrólito alcalino



Em geral, a eletrólise se processa em uma solução de hidróxido de potássio, onde a concentração varia em função da temperatura de operação da célula eletrolítica de acordo com os seguintes valores:

- de 25% em massa para uma temperatura de 80 a 90 °C;
- de 30 a 35% a 120 °C;
- de 40% a 160 °C.

Considerando-se um processo reversível, o balanço energético indica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energia elétrica} \\ \text{fornecida ao sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Variação da energia} \\ \text{química do sistema} \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

ou

$$E \cdot Q = - \Delta G \quad (2.9)$$

Onde:

- E = tensão mínima para a eletrólise
- Q = carga transferida à reação
- ΔG = variação da energia livre de Gibbs da reação

2.1.6 – Tensão na Célula Eletrolítica

A aplicação da teoria termodinâmica ao processo conduz aos seguintes resultados:

- Voltagem mínima para o desenvolvimento das reações (1,23 volts) (PLETCHER e WALSH, 1993).

$$E_1 = \frac{-\Delta G}{n.F} \quad (2.10)$$

- Voltagem termoneutra, onde não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente (1,47 volts) onde a célula operaria com eficiência de 100 % (BOCKRIS e CONWAY, 1975).

$$E_2 = \frac{\Delta H}{n.F} \quad (2.11)$$

- n: número de elétrons transferidos na reação
- F: constante de Faraday (96.485 Coulombs/equivalente)
- ΔH : variação da entalpia da reação

Tanto E_1 como E_2 são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo. Esses resultados implicam nas seguintes conclusões, apresentadas na Figura 2.6 (CASPER, 1978).

- A eletrólise da água não ocorre para tensões, fornecidas ao sistema químico, abaixo de E_1 (curva 1);
- Para tensões entre E_1 e E_2 , a eletrólise ocorre desde que o calor seja fornecido ao sistema (processo endotérmico);
- Para tensões acima da voltagem termoneutra E_2 (curva 2), o calor é transferido ao meio ambiente (processo exotérmico).

Na prática, os sistemas químicos descritos, conhecidos como células eletrolíticas, operam todos na Região C, com uma tensão aplicada acima do limite inferior determinado pela termodinâmica.

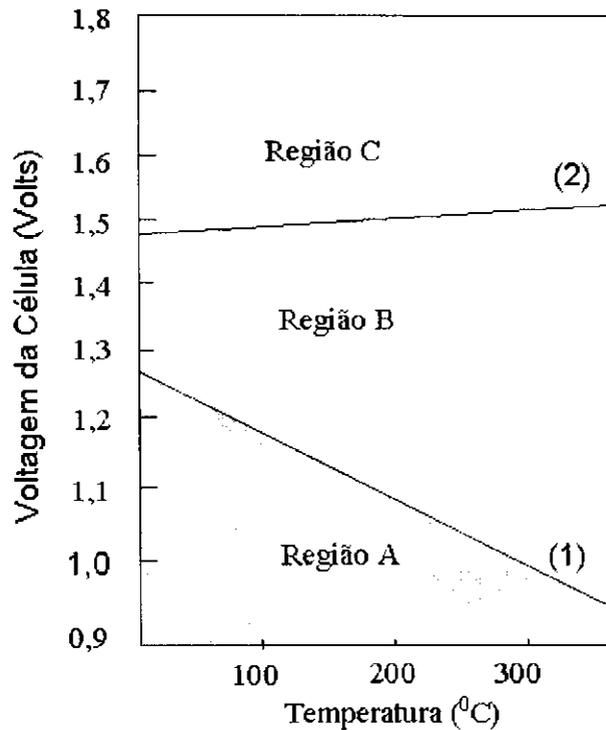


Figura 2.6 – Curvas de tensão em função da temperatura para a eletrólise da água.

- Região A: Impossível a geração de H_2 ;
- Região B: Geração de H_2 através de calor e eletricidade;
- Região C: Geração de H_2 e calor através de eletricidade;
- Curva (1) : Tensão Reversível (E_1);
- Curva (2) : Tensão Termoneutra (E_2).

2.1.6.1 - Sobretensões

A diferença entre a tensão necessária para a operação de uma célula, a uma determinada pressão e temperatura, e a tensão mínima estabelecida termodinamicamente para as mesmas condições de operação é denominada sobretensão da célula e pode ser escrita da seguinte forma (ANDRADE, 1993):

$$\eta_{\text{total}} = V - E \quad (2.12)$$

onde:

- E – voltagem teórica requerida (volts)
- V – voltagem real ou de operação (volts)

Os principais efeitos que geram a sobretensão podem ser:

- a) Queda da condutividade do meio condutor iônico, causada pela concentração de íons junto aos eletrodos;
- b) Aparecimento de “nuvens” de moléculas em torno dos íons, reduzindo grandemente a mobilidade iônica;
- c) Cinética de reação lenta nos eletrodos;
- d) Acúmulo de gases junto aos eletrodos, reduzindo a área disponível de reação.

A voltagem real de operação da célula é a soma da tensão teórica requerida, da sobretensão anódica (η_a), da sobretensão catódica (η_c) e da tensão devida à resistência elétrica da célula (IR_o):

$$V = E + \eta_a + \eta_c + IR_o \quad (2.13)$$

Cada uma destas contribuições poderá ser maior ou menor, dependendo do sistema eletroquímico que está sendo considerado (GOLDFARB et al., 1989).

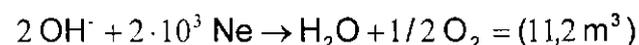
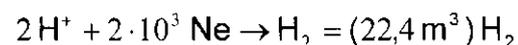
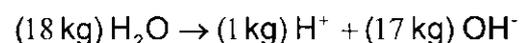
Dada a natureza desses fatores, o efeito produzido pela sobretensão na célula caracteriza-se por um processo irreversível, onde a energia necessária para vencer a sobretensão é dissipada na forma de calor. O maior objetivo dos programas de desenvolvimento da eletrólise é a redução do valor dos termos η_a , η_c e IR_o , com o propósito de obter elevada eficiência, uma vez que o rendimento térmico (R_t) é dado pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{|\Delta H|}{nFV} \quad (2.14)$$

Assim, qualquer aumento de rendimento dependerá de η_a , η_c e IR_o .

A energia necessária para se produzir 1 m³ de hidrogênio pode ser calculada da seguinte forma:

Para a eletrólise de 1 kg mol (18 kg) de água, teremos:



Onde, $N = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ é o número de Avogrado; $e = 1,6021 \times 10^{19} \text{ C}$ é a carga do elétron. Logo a quantidade $Ne = F = 96,494 \times 10^3 \text{ C}$ é a quantidade de eletricidade movimentada para realizar o processo. Que também pode ser expressa por:

$$Ne \times 10^3 / 3600 = 26,80 \text{ kAh}$$

Logo, para produzir $22,4 \text{ m}^3$ de H_2 e $11,2$ de O_2 nas CNTP. São necessários 18 kg de água e deve-se transportar $2 \times 26,80 \text{ kAh} = 53,61 \text{ kAh}$ de eletricidade. Para produzir $1 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 e $0,5 \text{ m}^3$ de O_2 nas CNTP uma célula de eletrólise deverá se atravessada por uma corrente elétrica de $2,393$ ($53,61/22,4$) e consumirá $0,803 \text{ kg/h}$ ($18/22,4$) de água. Assim a energia consumida no processo para manter a produção de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ será:

$$E = 2,393 \times V \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3\text{H}_2} \right) \quad (2.15)$$

onde V é tensão de operação de cada par de eletrodos em volts e E em ($\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{H}_2$).

A eficiência de uma célula eletrolítica em termos da tensão é representada pela seguinte equação (PEREIRA, 1999):

$$\eta(\%) = \frac{1,47}{V} \times 100 \quad (2.16)$$

As células eletrolíticas industriais operam com uma diferença de potencial que varia de $1,7$ a $2,1$ volts, o que corresponde a um rendimento de 70 a 85% , para um consumo de energia elétrica geralmente de 4 a $6 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ de hidrogênio (Memento de L'Hydrogène, 2002).

2.1.7 – Densidade de Corrente

A taxa de geração de hidrogênio é proporcional à corrente que passa através de uma célula eletrolítica. Para uma célula operando em meio alcalino tem-se:



Logo, precisa-se de 2F para produzir 1 mol (0,0224 m³) de hidrogênio, onde F é a constante de Faraday (96.485 Coulombs). Tem-se que 1 A = 1 C/s = 3600 C/h; dividindo-se pela constante de Faraday tem-se: 0,0373 F/h. Fazendo-se a relação deste fator com a equação estequiométrica (2.17), obtém-se a taxa de geração de hidrogênio relacionada à corrente aplicada na célula, representada por:

$$R_G = 4,2 \cdot 10^{-4} \times I \quad (2.18)$$

onde R_G é a taxa de geração de hidrogênio em m³/h, e I é a corrente dada em Amperes.

Dividindo ambos os lados da equação (2.18) pela área da célula A , resulta numa relação correspondente entre a taxa de produção de hidrogênio por unidade de área de célula e a densidade de corrente:

$$\frac{R_G}{A} = 4,2 \cdot 10^{-4} \times J \quad (2.19)$$

onde, A é a área da célula (m²) e J é a densidade de corrente (Amperes/m²).

2.1.8 – Curvas de Polarização

Já que a voltagem da célula e a densidade de corrente são muito importantes quando da otimização da célula eletrolítica ou do sistema, a relação desses parâmetros é especialmente significativa. A esta relação dá-se o nome de “Curva de Polarização” (COX & WILLIAMSON, 1977).

Pela Figura 2.7, observa-se que para baixos valores de densidades de corrente a tensão de operação aproxima-se da voltagem mínima termodinâmica. Ao contrário, com o aumento da densidade de corrente, ocorre uma maior contribuição dos termos η_a , η_c e IR_o . Pode-se observar ainda que a curva A refere-se a uma célula de menor eficiência, enquanto a curva B mostra uma célula mais eficiente.

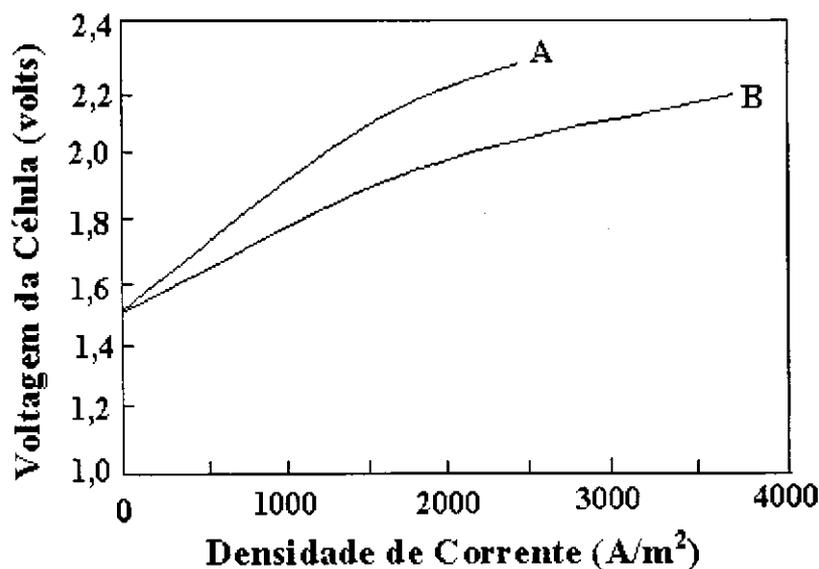


Figura 2.7 – Curvas típicas de voltagem versus densidade de corrente para células eletrolíticas (SILVA, 1991)

2.1.9 – Efeito da Temperatura e da Pressão

A Figura 2.6, mostrada anteriormente relaciona as tensões termodinâmicas E_1 e E_2 com a temperatura. Na prática, os termos η_a , η_c e IR_o reduzem-se consideravelmente com o aumento da temperatura. Como resultado, os efeitos de polarização nas células são reduzidos com o aumento da temperatura (COX & WILLIAMSON, 1977).

Vários estudos mostram que a voltagem das células reduz de uma forma linear com a temperatura, para densidades de corrente constantes. Por outro lado, com o aumento da temperatura provoca-se uma maior evaporação da água e do eletrólito, ocorrendo aumento da corrosão e redução na resistência dos materiais utilizados na construção das células, diminuindo desta maneira sua vida útil (SILVA, 1991). Na prática, células comerciais operam na faixa de temperatura de 70 a 120 °C (PEREIRA, 1999). Com o propósito de reduzir os efeitos do aumento da temperatura além da faixa de operação torna-se necessário pressurizar a célula, para evitar a perda excessiva de água por evaporação e até mesmo, em alguns casos, a ebulição do eletrólito. A pressurização das células aumenta o consumo de energia durante o processo. Em compensação, aumenta a eficiência da célula, devido à diminuição do tamanho das bolhas de gás junto aos eletrodos. A variação da energia teórica exigida na pressurização dos produtos da reação de eletrólise no caso de um processo reversível pode ser obtida pela Equação 2.24 (LABORDE, 1995).

Considerando um processo onde ocorre a redução do oxigênio pela transferência de 4 elétrons:



O ganho do potencial devido à mudança de pressão do oxigênio é obtido pela relação de Nernst, e é determinado por:

$$\Delta E_{r,c} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P''_{O_2}}{P'_{O_2}} \quad (2.21)$$

De modo semelhante, para a oxidação do hidrogênio tem-se:



O ganho do potencial é dado por:

$$\Delta E_{r,a} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P''_{H_2}}{P'_{H_2}} \quad (2.23)$$

Logo, o ganho total será dado pelo somatório do potencial do cátodo e do ânodo:

$$\Delta E_r = \Delta E_{r,c} + \Delta E_{r,a} \quad (2.24)$$

Para o caso especial onde a pressão dos dois reagentes são as mesmas tem-se:

$$\Delta E_r = \frac{3RT}{4F} \ln \frac{P''}{P'} \quad (2.25)$$

Sendo:

ΔE : variação da voltagem (volts);

R: constante dos gases;

P': pressão inicial dos gases;

P'': pressão final dos gases;

F: constante de Faraday.

2.1.10 – Componentes Básicos de uma Célula Eletrolítica

Na sua forma construtiva mais simples, uma célula eletrolítica, consta de um reservatório que contém a solução eletrolítica, ou eletrólito, eletrodos, nos quais ocorre a evolução dos gases, e diafragmas, ou separadores, posicionados entre os eletrodos.

- **Reservatório**

Serve para comportar o eletrólito. Em algumas células, é um tanque de aço provido de uma tampa, que possui a entrada, para o abastecimento de água e a saída para os produtos da eletrólise.

- **Eletrólito**

O eletrólito constitui-se de uma solução aquosa de um sal ou outro composto de boa condutividade elétrica quando em solução. O eletrólito deve possuir alta condutividade iônica; não deve decompor-se quimicamente por maior que seja a diferença de potencial aplicada à célula; não pode ser volátil a ponto de ser removido facilmente junto com os gases de saída; deve apresentar uma alta resistência a mudanças instantâneas de pH, uma vez que as concentrações dos íons hidrogênio mudam de forma contínua e rapidamente na superfície dos eletrodos. Estas características são conseguidas com o uso de um ácido forte, como o ácido sulfúrico, ou de uma base forte, como o hidróxido de potássio. A maior parte dos sais apresenta a tendência de se decompor quimicamente quando submetidos a altas tensões nas células, o que impossibilita seu uso. Os eletrólitos ácidos apresentam sérios problemas de corrosão. Assim, a maioria dos eletrolisadores comerciais opera com um eletrólito alcalino. Uma exceção ao uso de eletrólitos alcalinos é o uso de um material sólido polimérico de troca iônica, que também apresenta boa condutividade iônica. O maior êxito em trabalho com eletrólito sólido de troca

iônica, tem utilizado polímero ácido flúor poliestireno sulfônico (Nafion)[®] (LABORDE, 1995).

- **Eletrodos**

Os eletrodos são os pólos onde ocorrem as reações de oxidação e redução. Devem ser condutores elétricos; devem apresentar uma superfície catalítica adequada para a descarga dos íons hidrogênio e hidroxila, sendo, em células alcalinas, o níquel, mais comumente utilizado como catalisador de superfície. Visto que eletrodos de níquel puro são muito caros, é utilizado aço recoberto com a liga platina-níquel. Devem ter uma grande área de interface com o eletrólito, a qual pode ser obtida pelo uso de diversas estruturas sinterizadas, como juntas finas, telas, pratos perfurados e planos com superfície eletroquímica rugosa e, mais recentemente eletrodos volumétricos tipo esponjas (PEREIRA, 1999).

- **Separadores**

Os separadores estão posicionados entre os dois eletrodos, a fim de evitar o contato de um com o outro, evitando assim um curto-circuito, e impedir a mistura dos gases oxigênio e hidrogênio dentro da célula. Com o propósito de cumprir sua função satisfatoriamente, o separador deve ser feito de um diafragma poroso, através do qual a solução de eletrólito passa, proporcionando a condução dos íons de um compartimento da célula para outro. Esses poros devem permanecer cheios de líquido, de forma que os gases não possam penetrar neles. O material do separador deve resistir à corrosão pelo eletrólito na presença dos gases hidrogênio e oxigênio, e deve ter uma estrutura estável para uma longa vida de operação, como também para que os poros não se fechem com o tempo.

São feitos usualmente na forma de chapas, cuja espessura é determinada pelo esforço mecânico e limitações de misturas dos gases, para manter a menor resistência possível à passagem de íons. O material usado em

caso de células alcalinas tem sido o amianto. No caso da resina ácida polimérica de troca iônica, este material atua como próprio o separador. Para os casos onde não há necessidade de separar os gases, os separadores são desnecessários (CASPER, 1978).

Além dos componentes citados anteriormente, o sistema eletrolítico deve conter uma grande variedade de componentes. Alguns deles são: fonte de alimentação, incluindo transformadores e retificadores de corrente AC para DC; sistemas de refrigeração; sistemas auxiliares para condicionamento do gás produzido, incluindo purificação, secagem e compressão (PEREIRA, 2000).

2.1.11 – Tipos Básicos de Eletrolisadores

Os eletrolisadores podem ser classificados em duas categorias: clássicos, também conhecidos como convencionais, e modernos, ou avançados (BOCKRIS & CONWAY, 1975).

2.1.11.1 – Eletrolisadores Convencionais

Os eletrolisadores convencionais utilizam uma solução eletrolítica, em geral hidróxido de potássio dissolvido em água deionizada, como meio condutor iônico e distinguem-se essencialmente por suas maiores dimensões e menores densidades de corrente. Classificam-se de acordo com a disposição dos eletrodos em configuração unipolar ou bipolar. A diferença entre as duas configurações está relacionada principalmente ao tipo de arranjo elétrico dos eletrodos. Na configuração monopolar, as células individuais são agrupadas em paralelo e dividem o mesmo eletrólito. Na configuração bipolar, as células

estão conectadas em série e cada célula tem seu próprio eletrólito (Memento de L'Hydrogène, 2002)

A Figura 2.8 representa o esquema de um eletrolisador convencional unipolar, também conhecido como tipo tanque, onde cada um de seus eletrodos tem a mesma polaridade em ambas as faces, de modo que nela ocorre apenas uma única reação, ou seja, há evolução de hidrogênio ou oxigênio. Devido à ligação em paralelo dos eletrodos de mesma polaridade, a voltagem total da célula é equivalente a um par ânodo-cátodo. O eletrolisador é formado por um número suficiente de células ligadas em paralelo, de modo a fornecer a quantidade de gás desejada. A maior desvantagem da configuração unipolar é que cada célula requer altas amperagens e baixas voltagens, devido ao número de células conectadas em paralelo, o que implica em custos mais elevados (devido aos retificadores, barras condutoras caras e elevado volume). Entretanto, são de construção mais simples e manutenção mais fácil, possuindo menor custo por unidade de área da célula (SILVA, 1991).

Os arranjos bipolares algumas vezes são chamados de filtro prensa, no qual são conectados de forma alternados os eletrodos e diafragmas. Cada lado do eletrodo tem polaridade diferente, de modo que uma face serve de ânodo em uma célula e a outra serve como cátodo à célula adjacente. Todos os eletrodos estão isolados eletricamente de seus vizinhos e um par sucessivo, juntamente com um diafragma de separação, formam uma célula, como pode ser observado na Figura 2.9. A tensão global é o produto do número de células pela tensão de cada célula; isto implica maior tensão global e menor amperagem.

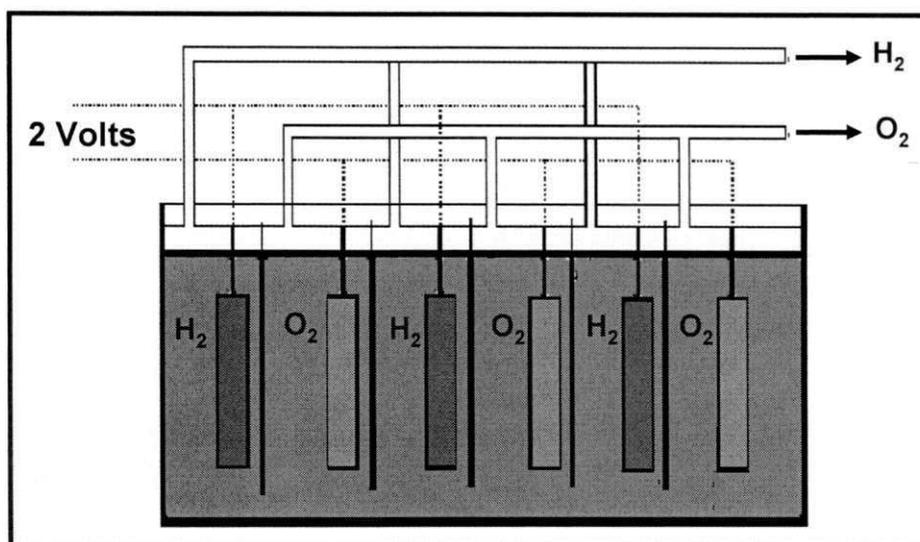


Figura 2.8 – Esquema de Arranjo de Eletrolisador Unipolar

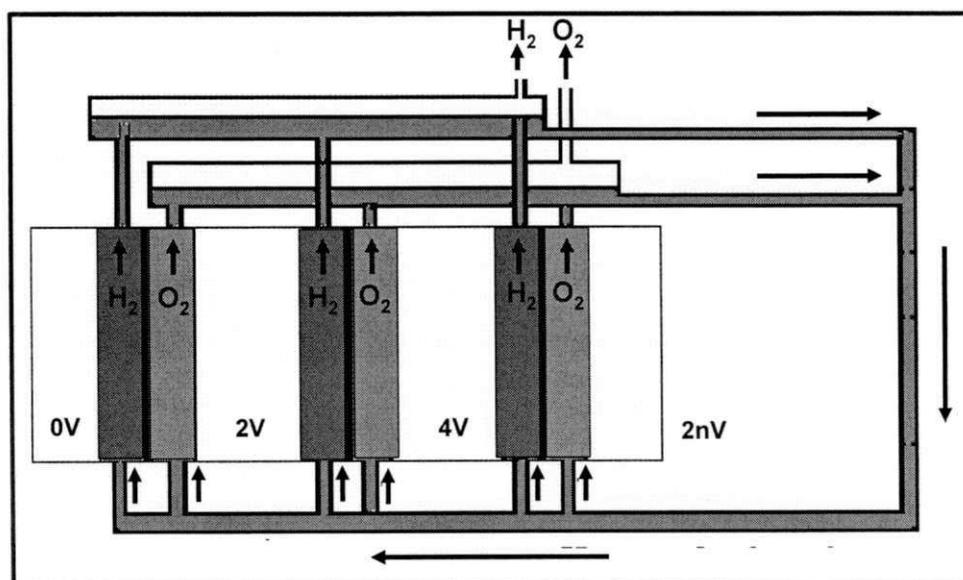


Figura 2.9 – Esquema de Arranjo de Eletrolisador Bipolar

2.1.11.2 – Eletrolisadores Avançados

Estes tipos de eletrolisadores são bastante semelhantes aos modelos convencionais, porém apresentam coberturas especiais nos eletrodos, com a disposição de catalisadores e superfícies rugosas. Alguns modelos utilizam membranas separadoras à base de teflon ou outros materiais, permitindo a operação do eletrolisador em temperaturas mais elevadas, entre 80 e 120 °C .

Os eletrolisadores avançados caracterizam-se basicamente por serem compactos com altas densidades de corrente e uso de catalisadores e metais nobres. O mais conhecido é um tipo especial da configuração bipolar, chamado de eletrolisador de eletrólito polimérico sólido (SPE), cuja principal característica é o emprego de uma membrana polimérica sólida PEM (Proton Exchange Membrane), Figura 2.10, com estrutura similar ao teflon, denominada nafion[®], que também atua como membrana separadora, permitindo uma grande proximidade dos eletrodos, além de necessitar apenas de circulação de água deionizada no interior da célula, que fornece água para a eletrólise, umedece a membrana, retira os gases e resfria a célula (SILVA, 1991).

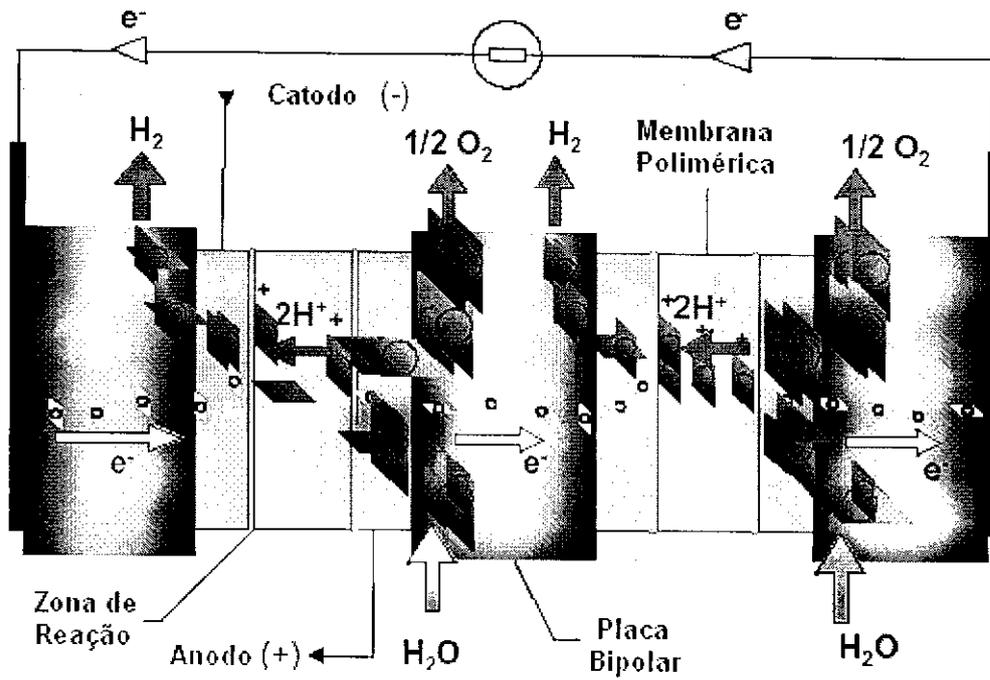


Figura 2.10 – Esquema de um Eletrolisador Avançado (PEM)
(Memento de L'Hydrogène, 2002)

2.2 – Argilas

São rochas naturais finamente divididas, com elevada percentagem de partículas cristalinas de argilominerais que passam totalmente na peneira ABNT número 325; possuem naturalmente forma lamelar ou fibrosa, decorrente da estrutura cristalina peculiar do argilomineral (SOUZA SANTOS, 1992). As argilas cerâmicas são divididas em três grandes grupos: argilas para cerâmica vermelha (produção de tijolos e telhas), argilas para cerâmica branca (produção de revestimento cerâmico e louças) e argilas para materiais refratários.

As argilas podem ser usadas para produção de tijolos maciços e furados, telhas, ladrilhos de pisos, objetos de adorno, lajes cerâmicas, revestimento cerâmico, entre outros. Todas as argilas apresentam, durante o processo industrial para a obtenção do produto acabado, três etapas comuns, que são: conformação, secagem e queima, que por si só justificam seu estudo unificado no grupo de “Argilas Cerâmicas” (MACEDO, 1997).

As boas características do produto final dependem fundamentalmente da qualidade da matéria prima utilizada. A Paraíba possui reservas de argilas com qualidade e volume apreciável, capazes de sustentar todo o seu parque industrial, sendo as fabricas de produtos cerâmicos em geral situadas próximo às fontes de matérias primas.

2.2.1 – Placas Cerâmicas para Revestimento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tendo como base a norma ISSO 13006 publicou em 1997 a norma NBR 13816, 13817 e 13818, que abrangem terminologia, classificação, especificação e métodos de ensaios. As placas cerâmicas para revestimento são definidas como: material composto de argila e outras matérias inorgânicas, geralmente utilizadas para

revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão, prensagem, ou outros processos de conformação, podendo ser esmaltadas ou não (SUDÉRIO, 2005).

As placas cerâmicas são divididas em grupos segundo os seguintes critérios (SUDÉRIO, 2005):

- Absorção de água (Abs);
- O método de fabricação, que influencia decididamente seu aspecto e aplicações;
- Resistência ao manchamento, classificada em cinco grupos numerados de 1 a 5, com a resistência aumentada de acordo com a numeração;
- Resistência ao ataque de agentes químicos, cujos níveis de resistência são definidos como de alta (A), média (B) e baixa (C), com relação a ácidos e a álcalis;
- Aspectos superficiais ou análise visual que definem se apresentam ou não defeitos visíveis em distância padrão, conforme normalização.
- Métodos de fabricação: extrusão (A), prensagem (B), outros (C)

Considerando os critérios anteriormente apresentados, obtém-se a classificação apresentada na Tabela 2.4 (Norma ABNT 13818, 1997).

Tabela 2.4 – Classificação de revestimentos cerâmicos

Grupos		Absorção (%)	Métodos de Fabricação		
			Extrusão (A)	Prensagem (B)	Outros (C)
I	Ia	$Abs \leq 0,5$	AI	Bla	CI
	Ib	$0,5 < Abs \leq 3$		B1b	
II	IIa	$3 < Abs \leq 6$	AIIa	BIIa	CII
	IIb	$6 < Abs \leq 10$		BIIb	
III		$Abs > 10$	AIII	BIII	CII

Outra classificação possível correlaciona os valores de absorção de água (Abs) e módulo de resistência à flexão (MRF) e é apresentado na Tabela 2.5 (Centro Cerâmico do Brasil, 1999)

Tabela 2.5 – Classificação em relação ao MRF e Abs

Produtos	Absorção de Água (%)	Módulo de Resistência à Flexão (MPa)
Porcelanato	0 – 0,5	35 – 50
Grés	0,5 – 3	30 – 45
Semi-Grés	3 – 6	32 – 35
Semi-Poroso	6 – 10	18 – 30
Poroso	10 – 20	15 – 20

2.2.2 – Caracterização de Argilas para Uso em Cerâmica Vermelha

Cerâmica vermelha é a designação geral empregada para produtos cerâmicos que apresentam corpo de cor vermelha, usualmente empregados como material cerâmico em construção civil (MACEDO, 1997).

Para a caracterização das argilas faz-se necessária a realização de ensaios tecnológicos visando à sua aplicação em cerâmica vermelha, segundo método proposto por (SOUZA SANTOS, 1992).

Os ensaios são feitos através de corpos de prova de perfil retangular de $6,0 \times 2,0 \times 0,5 \text{ cm}^3$, conformados em molde de aço sobre pressão de 20 MPa. Em seguida são secos a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. Logo após são queimados em atmosfera oxidante, em temperaturas entre $900 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, as quais cobrem a faixa de temperatura dos fornos industriais (MACEDO, 1997). Os corpos de provas queimados são submetidos aos ensaios de cor, absorção de água (Abs), massa específica aparente (MEA), porosidade aparente (PA), retração linear de queima (RLQ), perda ao fogo (PF) e módulo de resistência à flexão (MRF), sendo em seguida comparados com os valores das argilas brasileiras, apresentados na Tabela 2.6 (SOUZA SANTOS, 1992).

Tabela 2.6 – Característica cerâmica para argila vermelha após queima (SOUZA SANTOS, 1992).

Cor	Abs (%)	MEA (g/cm^3)	PA (%)	RLQ (%)	PF (%)	MRF (MPa)
Vermelho	$\leq 25,00$	$\geq 1,70$	$\leq 35,00$	-	-	$\geq 6,00$

3.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para se avaliar o desempenho de um sistema de aquecimento (forno) para a queima de argila utilizada na produção tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos, dando-se ênfase para este último. Foi ainda estudado seu desempenho para a produção de produtos derivados do trigo. O forno utilizado é do tipo mufla, o qual foi adaptado no Laboratório de Referência em Dessalinização, ligado ao Departamento de Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande. O mesmo faz uso de hidrogênio eletrolítico, como combustível alternativo, em substituição aos combustíveis convencionais, tais como: óleo diesel, gás natural e lenha; provenientes de fontes não renováveis e de alto poder de poluição ao meio ambiente.

3.1 – Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e reagentes:

- **Equipamentos:**

- Eletrolisador bipolar;
- Sistema de aquecimento (forno).

- **Produtos Químicos:**

- Água desmineralizada (LABDES);
- Benzina retificada;
- Etanol (DINÂMICA);
- Hidróxido de potássio (VETEC).

- **Argilas:**

- Placas laminadas e prensadas, gentilmente cedidas pelo Departamento de Engenharia de Materiais. A massa utilizada na confecção das placas laminadas foi fornecida pela Indústria, Cerâmica Cordeiro S.A., de João Pessoa. Já a argila para produção das placas prensadas é proveniente da região do Cariri paraibano.

- **Instrumentação:**

- Sistema de Aquisição de Dados HP 34970 A;
- Termopares do Tipo K;
- Relógio medidor de energia.

3.1.1 – Sistema Eletrolítico (Eletrolisador Bipolar)

O sistema eletrolítico utilizado possui as seguintes características:

- Tipo: Eletrolisador Bipolar
- Potência máxima do reator: 5000 W
- Tensão da rede: 220 V AC
- Tensão do Reator: 95 - 105 V
- Corrente máxima do reator: 50 A
- Pressão de trabalho: 1,5 kgf/cm²

O eletrolisador bipolar é constituído das seguintes unidades: reator eletrolítico, reservatório de eletrólito, sistema de refrigeração, purgadores, selos controladores de chama, fonte de alimentação, além de pressostato, regulador de pressão e um manômetro. O fluxograma do sistema eletrolítico é mostrado na Figura 3.1.

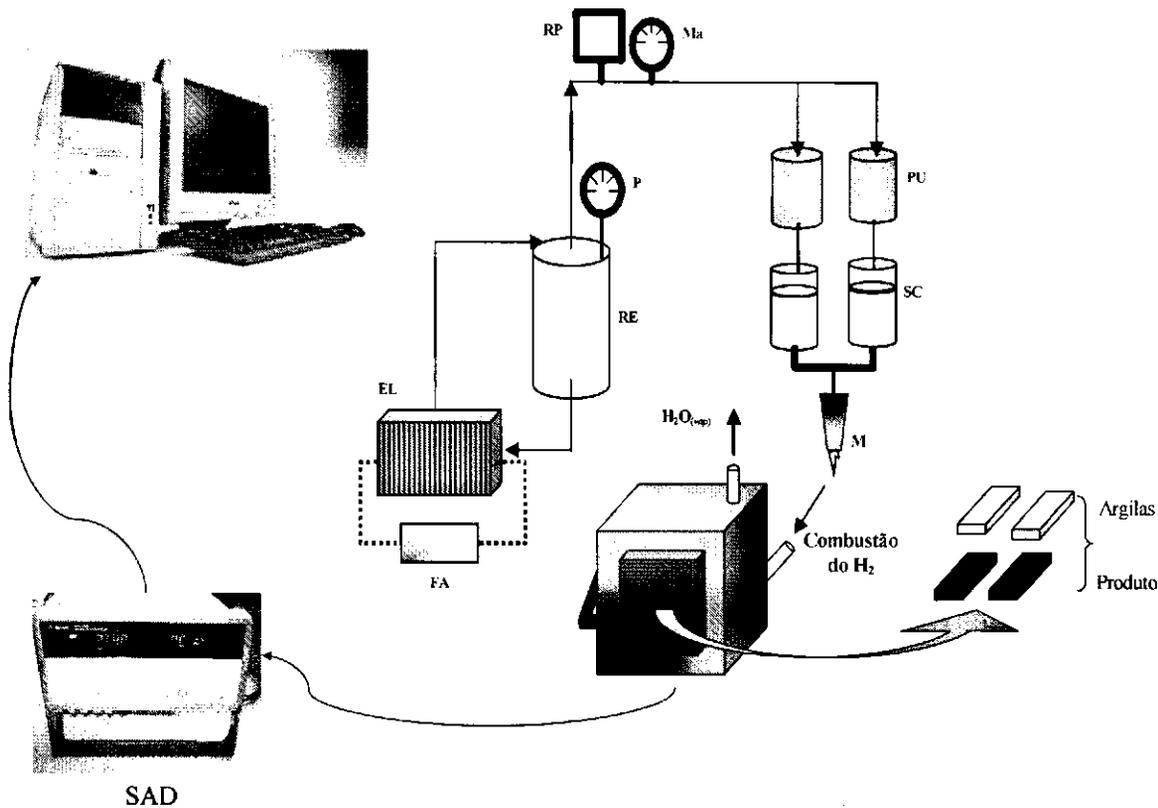


Figura 3.1 – Fluxograma do Processo Eletrolítico - Reator Eletrolítico (EL), Reservatório de Eletrólito (RE), Purgadores (PU), Selos Controladores de Chama (SC), Pressostato (P), Regulador de Pressão (RP), Manômetro (Ma), Maçarico (M), Fonte de Alimentação (FA) e Sistema de Aquisição de Dados (SAD).

O fluxo das substâncias no interior do sistema eletrolítico, representado na Figura 3.1, ocorre da seguinte forma: A solução de KOH a 28% desce do reservatório para o reator eletrolítico por gravidade, onde os gases hidrogênio e oxigênio são produzidos. Estes passam pelo reservatório de eletrólito, para deixar traços de eletrólito arrastado pela corrente de gás, seguem pelo regulador de pressão, que irá controlar a vazão dos gases. O manômetro registra a pressão de saída dos gases. Em seguida os gases passam pelos purgadores, selos controladores de chama, saindo pelo maçarico através de um tubo flexível para o forno. As temperaturas são lidas pelos

termopares conectados no forno e registradas no sistema de aquisição de dados, o qual está conectado em um micro computador, onde o programa do sistema analisa os dados e constrói as curvas de temperatura em função do tempo.

3.1.1.1 - Principais Componentes do Sistema Eletrolítico

- **Reator Eletrolítico Bipolar**

O reator eletrolítico ilustrado na Figura 3.2 é formado por 47 células ligadas em série, cada uma operando com uma diferença de potencial de 2,02 volts. As extremidades do reator são constituídas por dois cabeçotes, um em cada extremidade, de 300 mm de diâmetro cada, estando fixados por 06 parafusos.

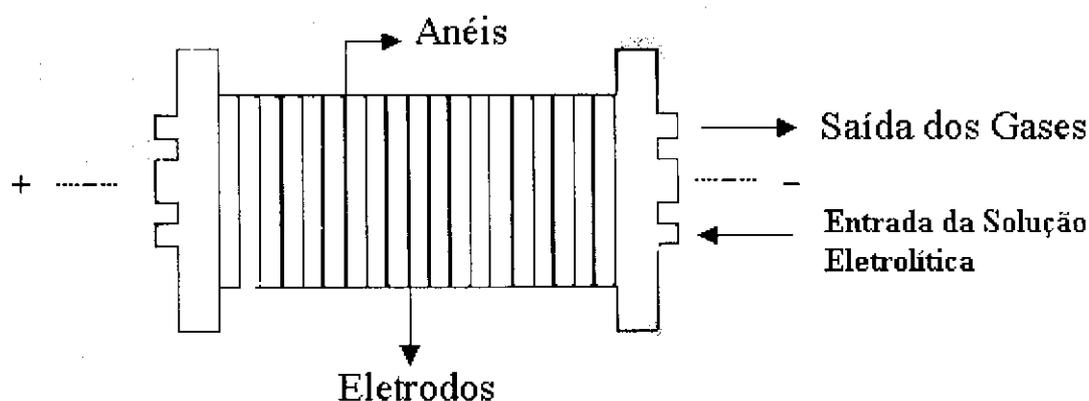


Figura 3.2 – Reator Eletrolítico

Entre os cabeçotes situam-se os eletrodos feitos com placas de aço 1020, niqueladas, de 1,0 mm de espessura e 200 mm de diâmetro, que são separados por um anel de PVC de 2,0 mm de espessura com 260 mm de diâmetro. O reator possui uma inclinação de 12 graus para que os gases formados saiam com mais facilidade, pelo tubo de coleta dos gases.

- **Reservatório de Eletrólito**

Os gases que são gerados no reator eletrolítico são conduzidos para o reservatório, onde são jateados na superfície do eletrólito contido no reservatório, para possibilitar a pré-remoção do excesso de eletrólito arrastado pelos gases, e também eliminar um possível recuo de chama em direção ao eletrolisador (Pereira, 1999). O reservatório é constituído de um cilindro de aço com 180 mm de diâmetro e 400 mm de altura. O reservatório é mostrado na Figura 3.3, na qual pode-se observar que além da abertura de saída do eletrólito, o mesmo possui a abertura de reabastecimento. O reabastecimento é feito com água destilada, que garante a autonomia do sistema durante cada batelada.

- **Sistema de Refrigeração**

Como mostra a Figura 3.3, existe no interior do reservatório de eletrólito uma serpentina na qual circula água. Esta atua como trocador de calor, cuja função é baixar a temperatura de emulsão gás-eletrólito, que sai do reator eletrolítico, facilitando a condensação do eletrólito arrastado, minimizando, assim, o arraste para os selos controladores de chama.

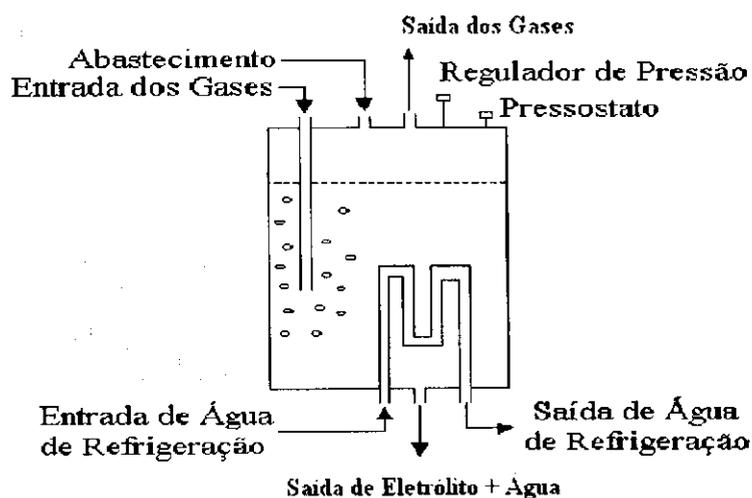


Figura 3.3 – Reservatório de Eletrólito e Sistema de Refrigeração

- **Purgador**

Este é um tubo cilíndrico constituído de aço, com 90 mm de diâmetro e 290 mm de altura, onde o gás com uma pequena quantidade de eletrólito entra na parte superior, sofrendo uma rápida expansão. O eletrólito, parte mais pesada da mistura gás-eletrólito, é condensado e os gases são conduzidos para os selos controladores de chama.

- **Selos Controladores de Chama**

O gás, após passar pelo purgador, é borbulhado através de um fluido orgânico (benzina e ou álcool etílico) com o objetivo de evitar o recuo da chama e produzir uma chama mais branda, diminuindo seu caráter explosivo. O álcool e a benzina são dois fluidos orgânicos que atendem tais características, da mesma forma que a acetona, quando é misturada ao acetileno. A Figura 3.4 mostra o desenho do selo controlador de chama.

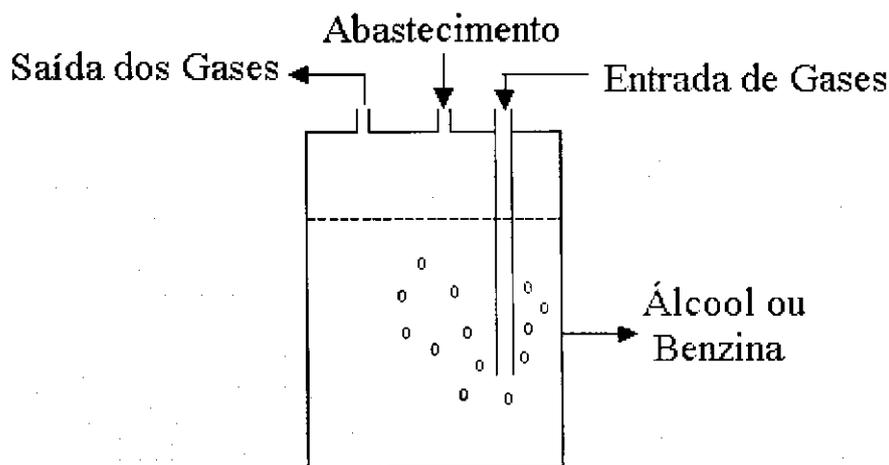


Figura 3.4 – Selo Controlador de Chama

- **Fonte de Alimentação**

A fonte de alimentação corresponde ao conjunto: transformador monofásico de 220V para 110V, retificador de corrente e disjuntor de segurança contra altas amperagens.

- **Pressostato**

Foi utilizado um pressostato, para controlar a pressão do sistema em aproximadamente $1,5 \text{ kgf/cm}^2$, durante a operação da máquina, com a finalidade de controlar o processo através da pressão de saída dos gases.

3.1.2. – Sistema de Aquecimento (forno)

- O forno foi adaptado a partir de uma mufla, da qual foi retirada toda a resistência elétrica interna, e o sistema de controle da temperatura. O forno estudado possui um volume interno aproximado de 7.000 cm^3 , e foi testado para três versões diferentes, com o objetivo de se obter o melhor rendimento térmico do sistema.
- Primeira versão: na parte traseira do forno foram abertos dois orifícios de 2,0 cm de diâmetro cada. Estes dois orifícios foram ligados entre si através de uma serpentina de aço inox, no formato em **U**. Desta forma, uma das extremidades da serpentina recebia a chama do maçarico e a outra foi conectada diretamente na entrada da chaminé, com o intuito de proporcionar a saída dos vapores gerados pela combustão do hidrogênio. Nesta configuração a chama aquecia a serpentina que iria aquecer o interior do forno, enquanto que o vapor de água gerado circulava pelo interior da serpentina, saindo em seguida pela chaminé. Esta versão não foi aprovada, devido a dois fatores: a alta temperatura da chama fundiu a serpentina próximo à extremidade do maçarico; a serpentina funcionava como uma

resistência para o aquecimento da câmara interna do forno, ocorrendo desta forma grande perda de calor na saída da chaminé.

- Segunda versão: nesta versão a serpentina foi substituída por uma pequena peça em aço inox, no formato cônico, para servir de suporte ao bico do maçarico. Desta forma o hidrogênio sofre a combustão diretamente na câmara interna do forno, obtendo assim melhor rendimento térmico durante o aquecimento do mesmo. Já o vapor de água gerado durante a combustão circulavam pelo interior do forno antes de saírem pela chaminé, possibilitando a elevação de temperatura do mesmo muito mais uniforme e eficiente.
- Terceira Versão: após a avaliação da versão anterior foi realizada no sistema outra alteração. Desta forma o forno que antes possuía uma chaminé com o diâmetro de 2,20 cm, foi substituída por outra de 1,10 cm de diâmetro. Esta modificação foi realizada visando-se melhorar o rendimento térmico do sistema durante o processo de aquecimento.

3.2. Métodos

3.2.1 – Instalação dos Sistemas (eletrolisador e forno)

O sistema eletrolítico foi instalado em local seco e em plano horizontal. Deve-se evitar ambientes fechados para que não haja acúmulo dos gases provenientes de um possível vazamento, e assim evitar riscos de incêndios ou mesmo explosões. A instalação elétrica deve estar preparada para suportar uma corrente de até 70 A. O sistema de aquecimento foi instalado em um plano horizontal, próximo ao sistema eletrolítico, ao alcance do maçarico.

3.2.2 – Operação com os Sistemas Eletrolítico e de Aquecimento

- **Sistema Eletrolítico**

O primeiro passo a ser observado, são os níveis de água e benzina e álcool, verificar se as torneiras do painel traseiro, tampões de abastecimento e maçarico estão fechados e ligar o sistema de refrigeração; logo após; realiza-se a primeira leitura do medidor de energia. Em seguida liga-se a chave disjuntora do eletrolisador e, com a chave seletora, posiciona-se a corrente em no máximo 30 amperes. Após um certo intervalo de tempo, ocorre o desligamento automático da máquina (amperagem cai a zero) significando que os gases já estão na pressão de trabalho. No final do experimento (batelada) observa-se o consumo de energia e o consumo de água e, em função destes parâmetros, obtém-se o volume de hidrogênio produzido e consumido durante cada batelada. Durante toda operação, a pressão de trabalho da máquina é calibrada para trabalhar em aproximadamente $1,5 \text{ kgf/cm}^2$.

Se os níveis de água, benzina e álcool estiverem abaixo do nível de referência, faz-se o reabastecimento dos mesmos. Isto é feito com o eletrolisador desligado, abrindo-se os tampões de reabastecimento e colocando-se a quantidade de líquido consumido.

- **Sistema de Aquecimento (forno)**

A operação do sistema de aquecimento é bastante simples. Primeiro colocam-se os corpos de prova de argila no interior do forno para sua respectiva queima. Em seguida, realiza-se a leitura das temperaturas dos termopares conectados ao forno que registram a sua temperatura interna, da parede externa e da chaminé. Após o eletrolisador atingir a pressão de trabalho, acende-se o maçarico, o qual é conectado ao forno, dando-se início a batelada. Em seguida fecha-se o forno e inicia-se o registro instantâneo de elevação das temperaturas, no sistema de aquisição de dados. O sinal

coletado é enviado para o computador, no qual o *software* do equipamento constrói as curvas de temperatura em função do tempo. Após o forno atingir a temperatura escolhida, procede-se então o apagamento da chama do maçarico. Neste momento, o sistema de aquisição de dados registra todas as temperaturas finais, bem como o tempo final de cada batelada. O controle da taxa de elevação da temperatura no interior do forno é feito manualmente, atuando-se diretamente nas válvulas de saída dos gases no maçarico. Através deste controle manual do fluxo, obtém-se o perfil de temperatura desejado em um maior ou menor intervalo de tempo.

- **Finalização da Operação**

Ao término do período de cada experiência, a finalização da operação é iniciada pelo apagamento da chama, seguido do desligamento da chave seletora de amperagens e do desligamento da energia do eletrolisador.

A maneira correta de se apagar a chama é fechando primeiro a válvula do lado do álcool (se estiver sendo utilizando) e em seguida, abrir totalmente a válvula do maçarico do lado da benzina, para que ocorra o descolamento da chama do bico e conseqüentemente seu apagamento. Após o desligamento da máquina, as válvulas do maçarico devem ser mantidas abertas, ao ar livre, para permitir a liberação dos gases remanescentes no eletrolisador, ocorrendo assim a despressurização da máquina. Em seguida, fecham-se as válvulas do maçarico, recolhendo-o para junto do eletrolisador.

3.3 - Ensaio Tecnológicos

Para fornos de alta temperatura, nos quais a indústria produz materiais de revestimento cerâmicos, foram moldados corpos de provas através do processo de laminação, com dimensões de aproximadamente 8,0 x 4,5 x 0,4 cm³. Em seguida foram secos a 110 °C, por um período de 24 horas e logo

após queimados em três temperaturas distintas (1050 °C, 1100 °C, 1150 °C), com o objetivo de se estudar o desempenho do forno no processo de queima das amostras. Depois da realização do processo de queima, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios tecnológicos de absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente, retração linear de queima, perda ao fogo e tensão de ruptura a flexão. Visando à caracterização física do material obtido, os valores dos ensaios foram comparados com as especificações segundo a norma técnica da ABNT NBR 13818 (1997).

Os corpos de provas usados em fornos de olarias, foram moldados através do processo de prensagem em forma de lâminas prismáticas, com dimensões aproximadas de 6,0 x 2,0 x 0,5 cm³, em molde de aço sobre a pressão estática de 20 MPa, em uma prensa com capacidade de 40 t. Logo após, todos os corpos de provas foram secos a 110 °C, por um período de 24 horas. Em seguida, os corpos de provas foram queimados na temperatura de 900 °C, para se verificar o desempenho do sistema de aquecimento no processo de queima das amostras. Após a queima, os corpos de provas foram submetidos aos seguintes ensaios: cor, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente, retração linear, perda ao fogo e tensão de ruptura a flexão. Os valores dos ensaios foram comparados com os valores das argilas brasileiras (SOUZA SANTOS, 1992).

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeira parte – O desempenho do sistema de aquecimento (*primeira, segunda e terceira versão*) foi avaliado com relação aos parâmetros de consumo de energia, hidrogênio, e através dos perfis de temperaturas interna, externa e chaminé do forno.

Segunda parte – Através dos parâmetros analisados, foi observado que o sistema de aquecimento da terceira versão apresentou melhor desempenho com relação ao consumo de energia e hidrogênio. Esta versão otimizada foi avaliada para as seguintes aplicações: cerâmica, olaria e panificação.

Terceira parte – Estimativa do custo de produção do hidrogênio eletrolítico a partir da energia elétrica convencional e de um sistema híbrido formado por painel fotovoltaico e bateria.

4.1 - Avaliação da Primeira Versão do Sistema de Aquecimento

Os perfis de temperatura obtidos a partir da primeira versão do sistema de aquecimento estão apresentados na Figura 4.1. A curva TIF apresenta uma fase de pré-aquecimento que vai até os primeiros 15 minutos. Neste ponto foi aumentado o fluxo de gás, sendo observado uma considerável mudança da inclinação de TIF e TSC, nas quais as temperaturas ascendem aproximadamente de 400°C para 670°C e de 180°C para 430°C, respectivamente. A partir dos 20 minutos, TIF e TSC continuam aumentando gradativamente até atingirem os valores máximos de 1050°C e 700°C; respectivamente para um período de aquecimento de 80 minutos. Observou-se que a TPE não sofreu uma alteração acentuada como as demais temperaturas; todavia, seu comportamento mostra um gradiente de perda de calor através das paredes do forno, atingindo uma temperatura de 150°C no final do experimento. Durante este experimento ocorreu um consumo de 5,0 kWh de energia e de 0,753 m³ de hidrogênio.

Nesta configuração a chama do maçarico, cuja temperatura é de aproximadamente 2400°C (ANDRADE, 1993) superaqueceu a serpentina, fundindo-a próximo à extremidade em que se conectava o maçarico. Neste caso a serpentina funcionou como uma resistência entre a chama e a área interna do forno, proporcionando perda de eficiência durante o processo de aquecimento. Este fato foi observado através do registro de TSC, que chegou a atingir 700°C. Este resultado ocasionou a modificação do sistema para a *segunda versão*, na qual foi retirada a serpentina do interior do forno, *primeira versão*, possibilitando desta forma a combustão do hidrogênio diretamente na câmara interna do sistema de aquecimento.

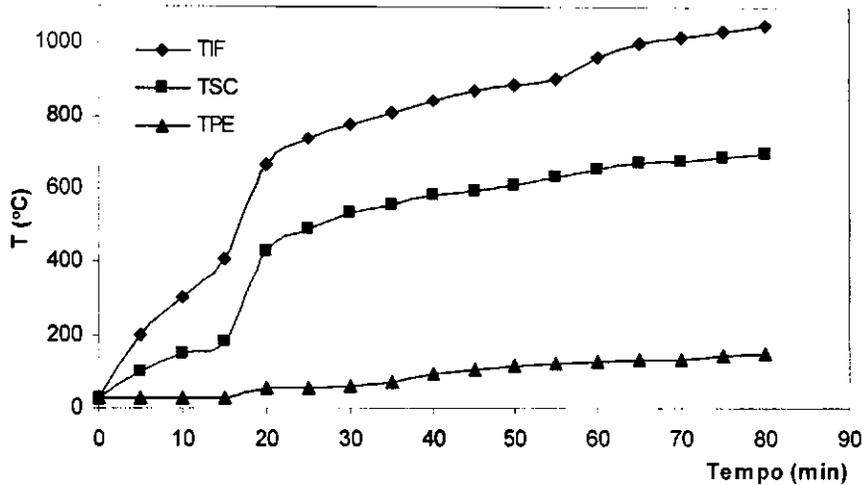


Figura 4.1 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), de saída da chaminé (TSC) e parede externa (TPE) da *primeira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050 °C.

4.2 – Avaliação da Segunda Versão do Sistema de Aquecimento

Nesta segunda versão do sistema foram realizados experimentos com temperatura de queima de 1050 °C (Figura 4.2), 1100 °C (Figura 4.3) e 1150°C (Figura 4.4), durante um período de 1 hora, mostrando também o consumo de energia.

Os resultados apresentados na Figura 4.2 mostram que para a temperatura de 1050°C a fase de pré-aquecimento vai até os primeiros 25 minutos, onde se observa que o perfil da curva TIF ascende até aproximadamente 480°C; já a temperatura da chaminé aproximou-se de 100°C, enquanto que a da parede permaneceu praticamente inalterada. A partir deste ponto o fluxo de gás foi aumentado, observando-se um rápido aumento na velocidade de aquecimento, onde a TIF atinge aproximadamente 780°C aos 30 minutos. Considerando o comportamento da chaminé representado pela curva TSC, observa-se neste intervalo de tempo, o mesmo comportamento na

velocidade de elevação da temperatura, a qual chegou a atingir aproximadamente 270°C. Após os 30 minutos, as curvas TIF e TSC tendem a um regime de estabilização, no qual a velocidade de aquecimento diminui, sendo alcançado as temperaturas finais de 1050°C e 418°C respectivamente aos 60 minutos. O perfil de temperatura representado pela curva TPE apresenta baixa velocidade de aquecimento, atingindo no final da batelada 74°C. Observa-se também na curva do consumo de energia (E) a fase de pré-aquecimento do forno, sendo consumidos nessa fase aproximadamente 0,1 kWh de energia a cada 5 minutos. Após esta fase, o sistema eletrolítico passa a consumir em média 0,36 kWh de energia a cada 5 minutos. No final, o sistema eletrolítico consumiu 3,0 kWh e 0,467 m³ de hidrogênio.

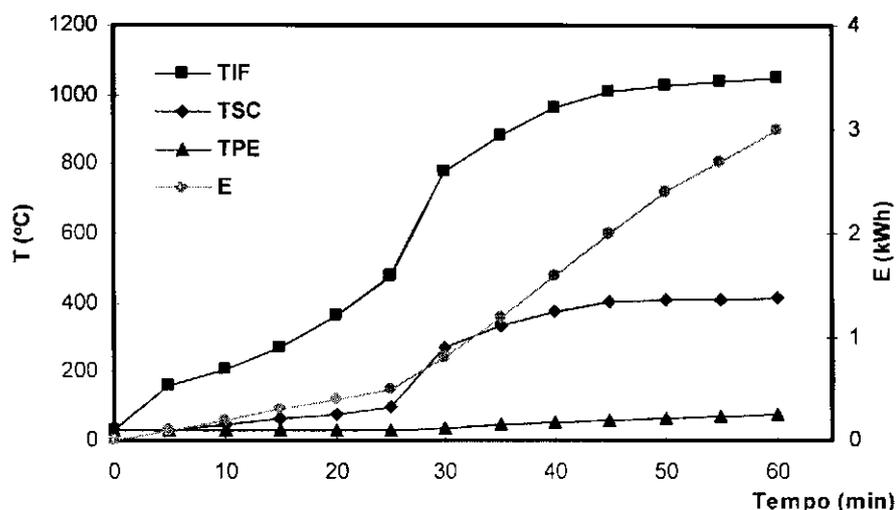


Figura 4.2 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), de saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e consumo de energia (E) da *segunda versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050 °C.

A Figura 4.3 apresenta os perfis de temperatura do sistema de aquecimento, para atingir a temperatura de 1100 °C. Observa-se, neste experimento a semelhança do desenvolvimento dos perfis de temperatura em relação aos perfis da Figura 4.2. Tendo-se porém a fase de pré-aquecimento finalizada aos 20 minutos, onde se registra para TIF a temperatura de aproximadamente 460°C e TSC 149°C. Aos 25 minutos os perfis de TIF e TSC

já atingiam, respectivamente, temperaturas de 770°C e 330°C. Ao final da batelada, as temperaturas finais registradas na chaminé e na parede externa foram, respectivamente, 511°C e 80°C. A curva do consumo de energia apresentou comportamento semelhante ao anterior, tendo-se consumido 3,40 kWh de energia, para um consumo de 0,498 m³ de hidrogênio.

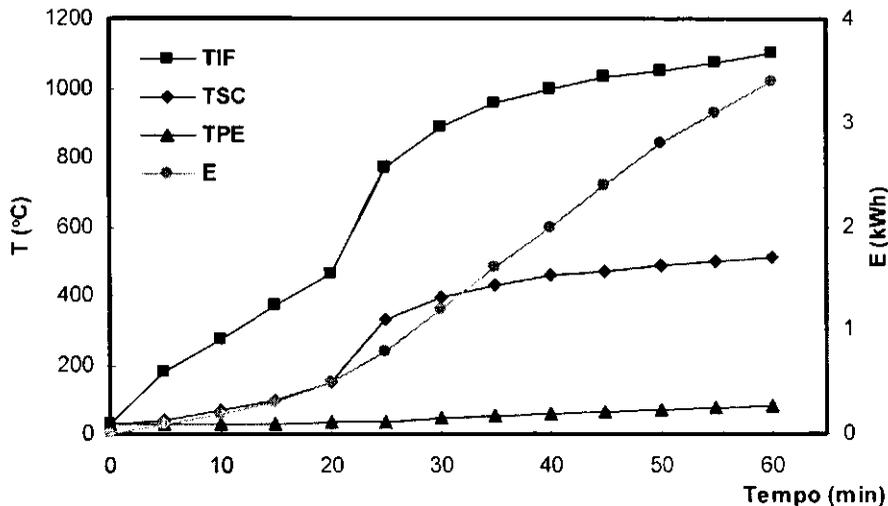


Figura 4.3 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *segunda versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100 °C.

A terceira temperatura de queima das amostras de argila foi de 1150 °C; os perfis de temperaturas do sistema de aquecimento estão ilustrados na Figura 4.4. Neste caso, a fase de pré-aquecimento se prolongou apenas até os 15 minutos, registrando para TIF e TSC aproximadamente 420°C e 110°C, respectivamente. Neste ponto, o fluxo de hidrogênio foi alterado, tendo as temperaturas de TIF e TSC atingido aos 20 minutos 745°C e 321°C, respectivamente. Da mesma forma que os casos anteriores, a taxa de aquecimento diminui progressivamente até atingir as temperaturas finais de 1150°C, 500°C e 80°C, respectivamente para TIF, TSC e TPE. Neste caso foram consumidos 3,80 kWh de energia e 0,591 m³ de hidrogênio.

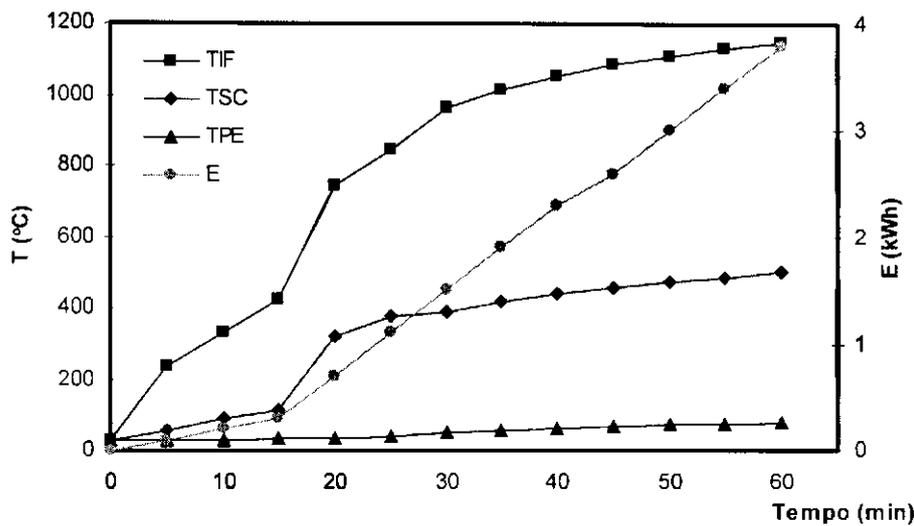


Figura 4.4 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *segunda versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150 °C.

4.2.1. – Cálculo do Consumo de Hidrogênio

O consumo de hidrogênio em cada batelada foi estimado de duas formas:

- Cálculo teórico a partir das equações 2.15 e 2.16, repetidas abaixo.

$$E = 2,393 \times V$$

e

$$\eta(\%) = \frac{1,47}{V} \times 100$$

Para o eletrolisador utilizado, a tensão de cada par de células (V) foi de 2,02 volts. A substituição deste valor na Equação 2.15 revela que são necessários 4,83 kWh para se produzir 1Nm³ de hidrogênio. Considerando-se a substituição do valor de V na equação 2.16, calcula-se que a célula apresenta eficiência de

73%. Através do consumo de energia em cada batelada, tem-se uma relação direta para a estimativa do consumo de hidrogênio. O eletrolisador utilizado neste trabalho para a produção de hidrogênio, apresenta valores de consumo de energia e eficiência dentro da faixa de valores dos eletrolisadores industriais. As células eletrolíticas industriais operam com uma diferença de potencial que varia de 1,7 a 2,1 volts, que corresponde a um rendimento de 70 a 85 %, para um consumo de energia elétrica geralmente de 4 a 6 kWh/Nm³ de hidrogênio (Memento de L'Hydrogène, 2002).

- Cálculo estequiométrico realizado a partir do consumo de água do eletrolisador em cada experimento.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores do consumo de energia e hidrogênio para as três bateladas.

Tabela 4.1 – Consumo de Hidrogênio e Energia – Segunda Versão do Sistema

Grupo	H ₂ O (L)	E (kWh)	V. Teórico	V.Prático	Erro (%)
			H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)	
1150°C	0,480	3,8	0,573	0,597	4,19
1100°C	0,430	3,4	0,512	0,535	4,49
1050°C	0,375	3,0	0,452	0,467	3,32

O erro calculado entre os métodos utilizados para se estimar o consumo de hidrogênio pode ser considerado desprezível, pois apresentou valores inferiores a 5%. O erro, pode ainda está relacionado ao grau de calibração do eletrolisador, que está relacionado com a concentração do eletrólito; temperatura e pressão de trabalho do eletrolisador; e de sua tensão e corrente de operação.

4.3 – Avaliação da Terceira Versão do Sistema de Aquecimento

Nesta versão, a chaminé do sistema de aquecimento da *segunda versão*; que possuía diâmetro de 2,20 cm, foi substituída por outra de diâmetro de 1,10 cm. Esta modificação foi realizada visando-se melhorar o rendimento térmico do sistema durante o processo de aquecimento, e diminuir o consumo de energia e hidrogênio.

A *terceira versão* mostrou melhor desempenho do sistema de aquecimento, tanto no aspecto de eficiência térmica, quanto no consumo de energia e hidrogênio. Estes fatores consubstanciaram a escolha desta versão do sistema para ser avaliada nas três aplicações alvo deste trabalho. A Tabela 4.2 apresenta os valores do consumo de energia e hidrogênio para o caso em análise.

Tabela 4.2 – Consumo de Hidrogênio e Energia – Terceira Versão do Sistema

Grupo	H ₂ O (L)	E (kWh)	V. Teórico	V.Prático	Erro (%)
			H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)	
1150°C	0,45	3,6	0,542	0,560	3,32
1100°C	0,40	3,2	0,482	0,498	3,32
1050°C	0,38	3,0	0,452	0,473	4,65

A Tabela 4.3 apresenta o quadro comparativo do consumo de energia e hidrogênio e o perfil de TSC para as três versões do sistema analisados nas temperaturas de 1050°C, 1100°C e 1150°C. Ressalta-se que na primeira versão o sistema alcançou apenas a temperatura de 1050°C em 70 minutos.

Tabela 4.3 – Comparação das Três Versões do Sistema de Aquecimento

TIF(°C)	Versão (1)			Versão (2)			Versão (3)		
	E (kWh)	H ₂ (m ³)	TSC (°C)	E (kWh)	H ₂ (m ³)	TSC (°C)	E (kWh)	H ₂ (m ³)	TSC (°C)
1050	5,0	0,753	700	3,0	0,467	418	3,0	0,473	310
1100	-			3,4	0,535	500	3,2	0,498	339
1150				3,8	0,597	511	3,6	0,560	353

4.3.1 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Cerâmicas.

Para cada temperatura de queima foram analisadas quatro bateladas distintas, tendo os perfis das temperaturas de TIF, TSC, e TPE, sido reproduzidos de tal forma que apresentassem resultado mais semelhante possível. Esses perfis foram analisados em gráficos do tempo de cada experimento em função da temperatura dos perfis, como também do tempo em função do consumo de energia. Em seguida foram plotados gráficos separados dos perfis de TIF, TSC e TPE em função do tempo, para as quatro bateladas, objetivando-se expressar um perfil médio de cada temperatura. Através do *software* Excel, foram traçadas, em relação ao perfil médio, as linhas de tendência de cada uma das curvas em polinômios de sexto grau. Este tipo de equação foi escolhido por apresentar, dentre os modelos disponíveis no *software*, o melhor fator de correlação.

As Figuras 4.5 a 4.8, representam as bateladas para a temperatura máxima do perfil de TIF de 1150°C. Observa-se em todas as figuras a semelhança durante o desenvolvimento dos perfis de TIF, TSC e TPE, como também da curva E, que representa o consumo de energia durante cada batelada. Analisando os perfis, observa-se que a fase de pré-aquecimento do forno se estende até os primeiros 12,5 minutos. Neste ponto a temperatura média de TIF para os quatro casos é de aproximadamente 329°C e 51°C, porém TSC; TPE permanecem praticamente inalteradas. Aos vinte minutos, a temperatura média de TIF já alcançou 730°C e TSC 175°C, tendo ainda a TPE atingindo, em média, aproximadamente 37°C. A partir dos vinte minutos, o perfil de TIF, sofre um controle mais criterioso, através do fluxo de hidrogênio, para se atingir a temperatura desejada de 1150°C. A curva (E), durante a fase de pré-aquecimento, apresentou consumo de 0,1 kWh, a cada cinco minutos. Nesta fase o eletrolisador trabalha com menor potência, produzindo menos hidrogênio. Logo após o fluxo ser aumentado, a máquina passa a produzir mais hidrogênio e a consumir em média 0,37 kWh de energia

a cada cinco minutos. Os consumos finais de energia e de hidrogênio foram, respectivamente, em média, 3,6 kWh e 0,56 m³.

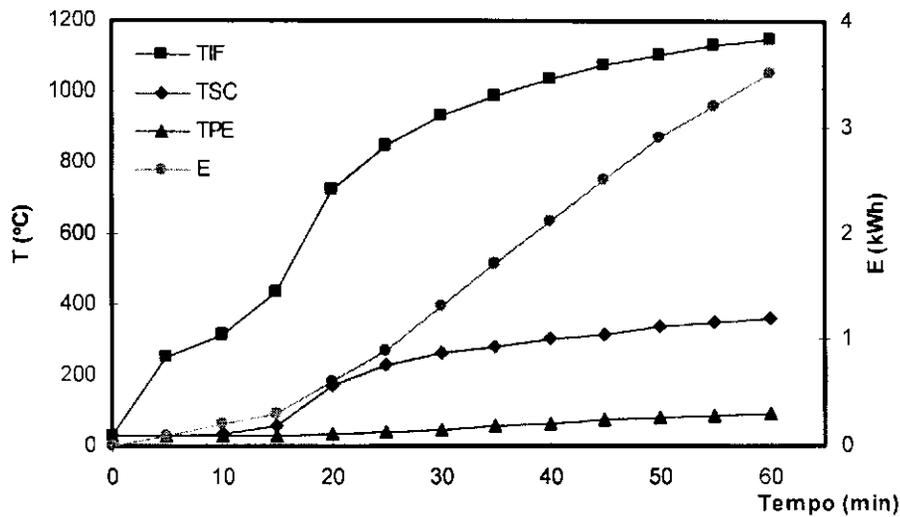


Figura 4.5 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C (1ª batelada).

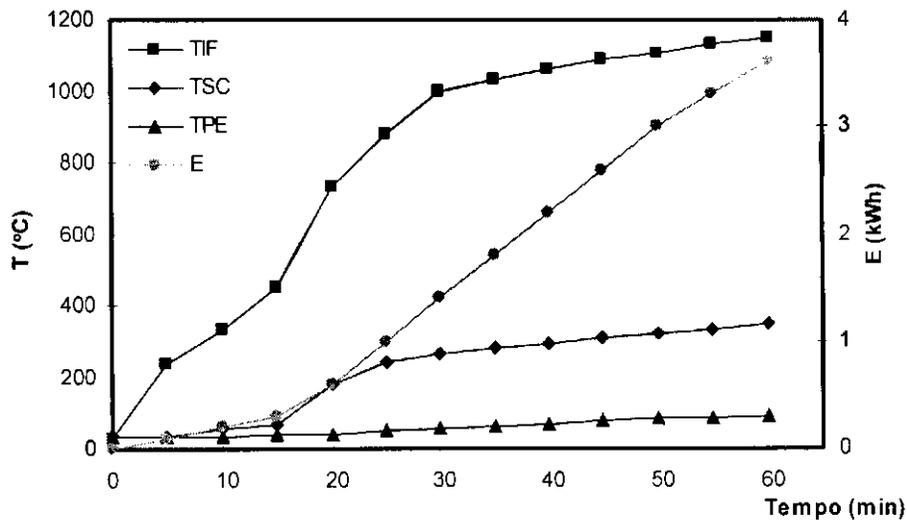


Figura 4.6 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C (2ª batelada).

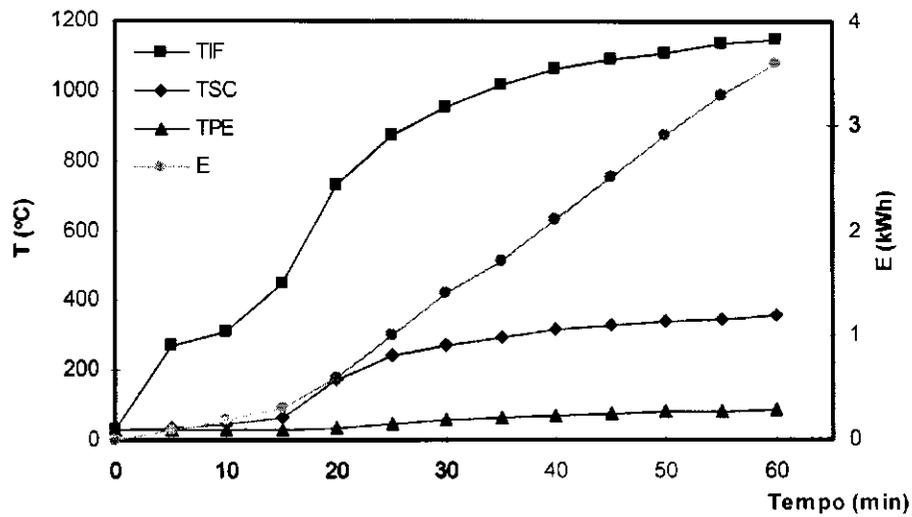


Figura 4.7 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C (3ª batelada).

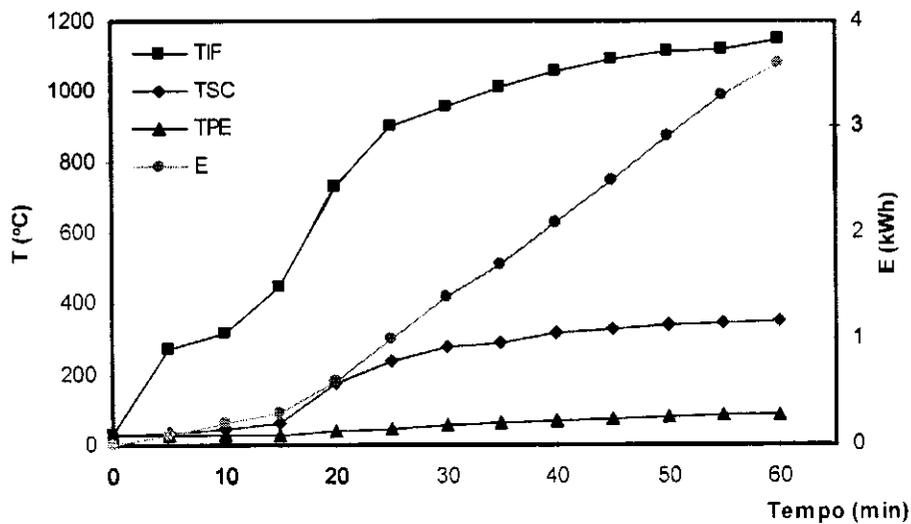


Figura 4.8 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1150°C (4ª batelada).

As Figuras 4.9 a 4.12, representam os perfis de TIF, TSC, TPE e E, para atingir a temperatura final de TIF correspondente à 1100°C. Para este caso em análise, o período de pré-aquecimento do forno se prolongou até os vinte minutos. Neste ponto, a temperatura média de TIF para as quatro bateladas é de aproximadamente 475°C e de 70°C para TSC. Como no caso anterior, TPE permanece praticamente inalterada. Após esta fase, o fluxo de gás foi aumentado, tendo os perfis de TIF e TSC apresentado a maior taxa de aquecimento no intervalo dos 20 aos 25 minutos. Nesta fase, TIF e TSC chegam a atingir em média as temperaturas de 760°C e 190°C, registrando-se ainda para TPE em média 40°C. A partir deste momento, os perfis se desenvolvem com menores taxas de aquecimento, chegando a atingir as temperaturas finais de TIF, TSC e TPE respectivamente de 1100°C, 340°C e 80°C. Os perfis da curva E apresentam comportamentos semelhantes aos anteriores, tendo-se consumido ao final das bateladas, em média, 3,2 kWh, para um consumo médio de hidrogênio de 0,498 m³.

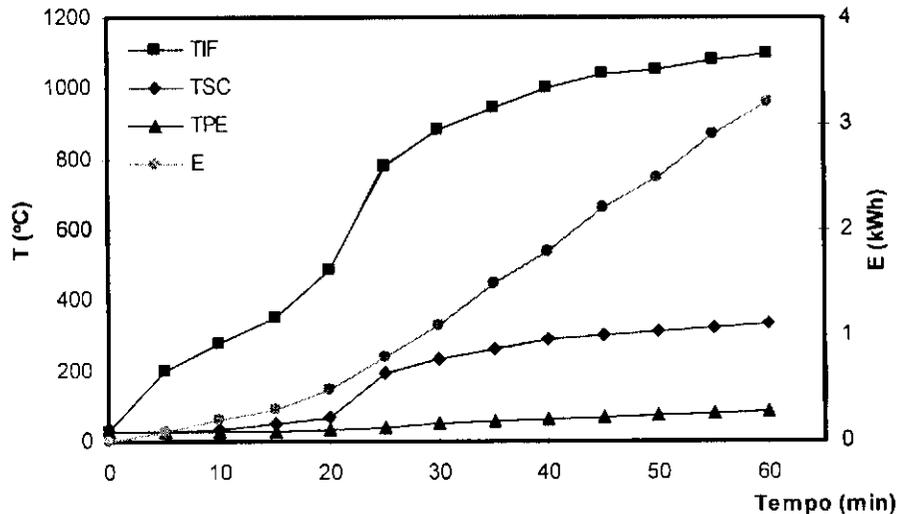


Figura 4.9 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C (1ª batelada).

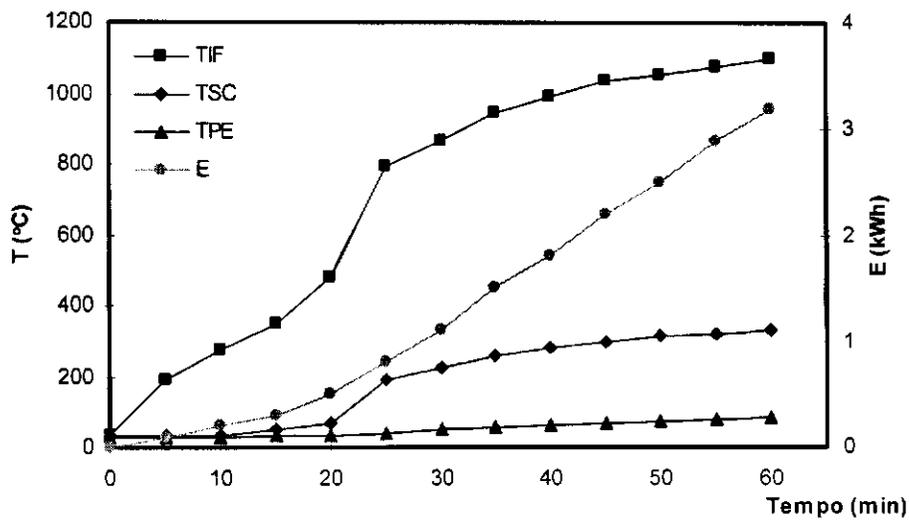


Figura 4.10 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C (2ª batelada).

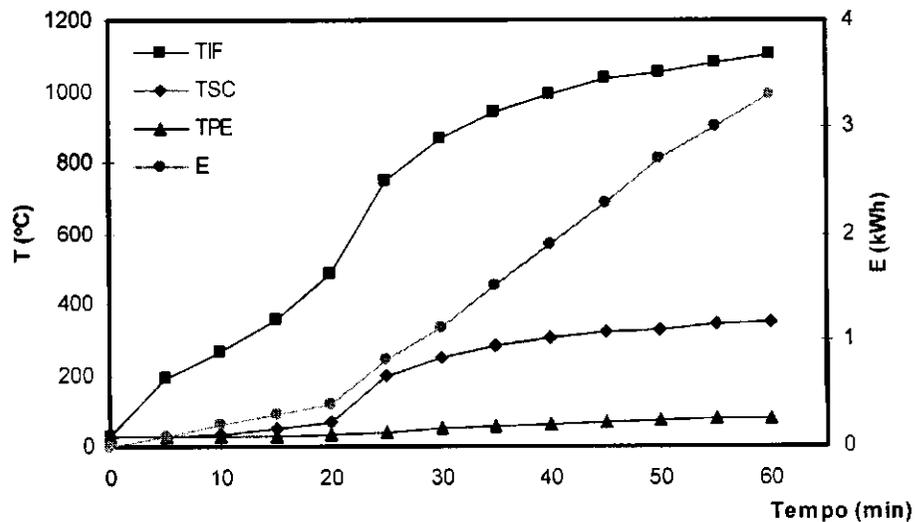


Figura 4.11 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C (3ª batelada).

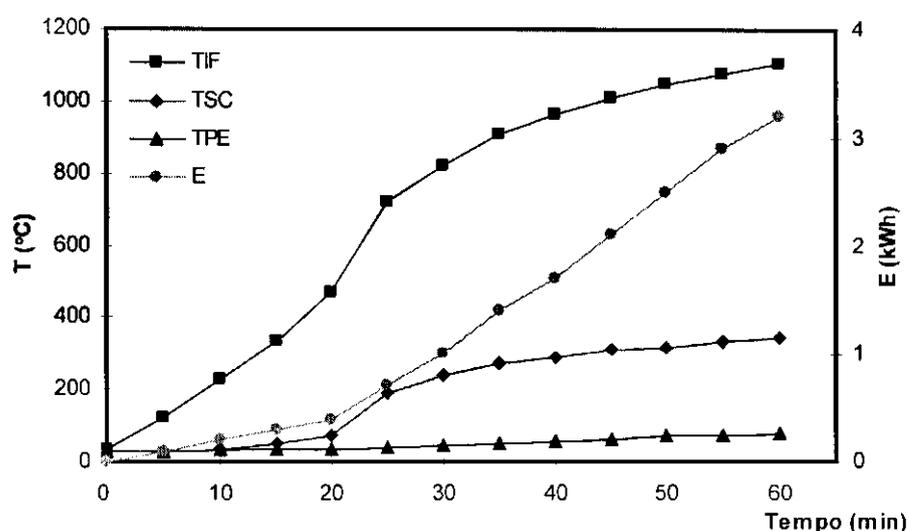


Figura 4.12 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1100°C (4ª batelada).

As figuras 4.13 a 4.16, representam os perfis de TIF, TSC, TPE e E, das bateladas realizadas para alcançar a temperatura final de 1050°C. Neste perfil, a fase de pré-aquecimento se desenvolve até os 25 minutos, sendo registradas neste ponto as temperaturas médias de aproximadamente 500°C e 70°C para TIF e TSC, respectivamente. A maior taxa de aquecimento ocorre no intervalo dos 25 aos 30 minutos, tendo-se registrado as temperaturas médias de 800°C e 205°C para TIF e TSC, respectivamente. Neste ponto, TPE alcançou em média 45°C e as temperaturas médias finais para TSC e TPE foram em torno de 310°C e 80°C, respectivamente. Neste conjunto de bateladas foram consumidos em média 3,0 kWh de energia e 0,473 m³ de hidrogênio.

Da mesma forma que os perfis de temperatura de 1150°C e 1100°C se desenvolveram, o perfil de TIF a 1050°C também apresenta comportamento semelhante aos anteriores, sendo observadas para os três casos duas fases distintas: a primeira fase, de pré-aquecimento, e a segunda fase, que é a de controle mais rigoroso de desenvolvimento do perfil durante o processo de aquecimento. O fato caracterizador entre os perfis está na fase de pré-aquecimento, tendo-se registrado respectivamente para os perfis de 1150°C,

1100°C e 1050°C os tempos de cada uma dessas fases de 12,5, 20 e 25 minutos, respectivamente.

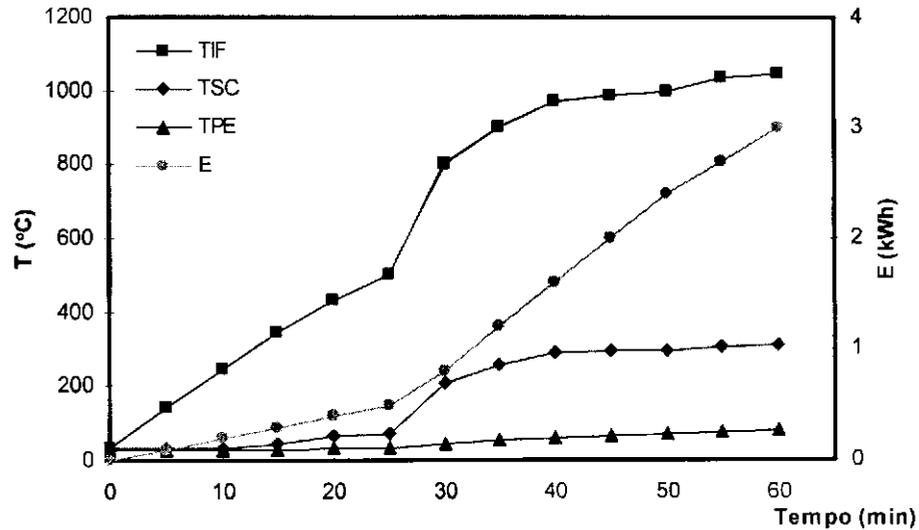


Figura 4.13 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C (1ª batelada).

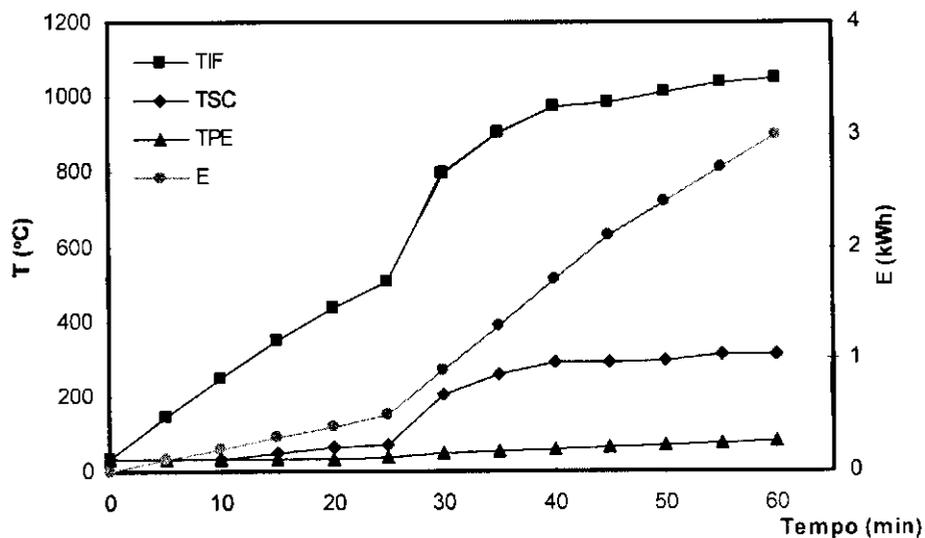


Figura 4.14 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C (2ª batelada).

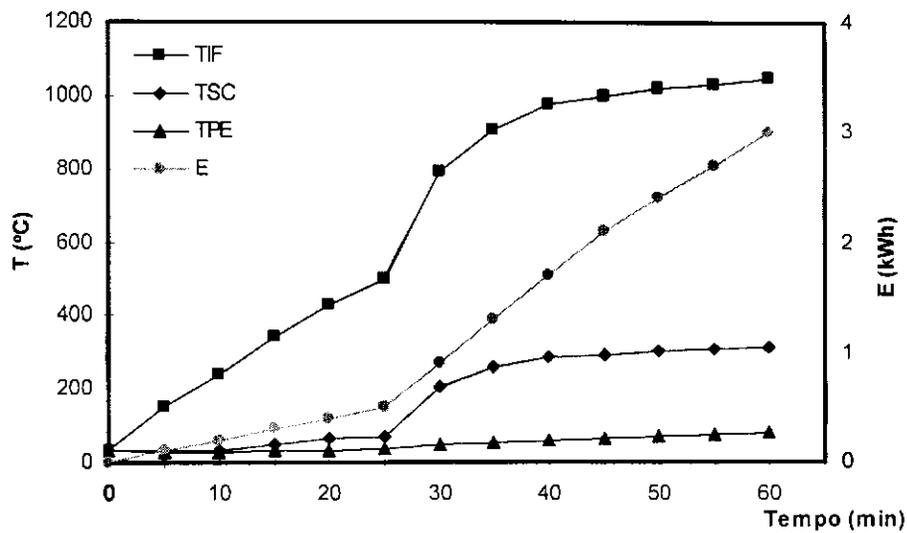


Figura 4.15 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C (3ª batelada).

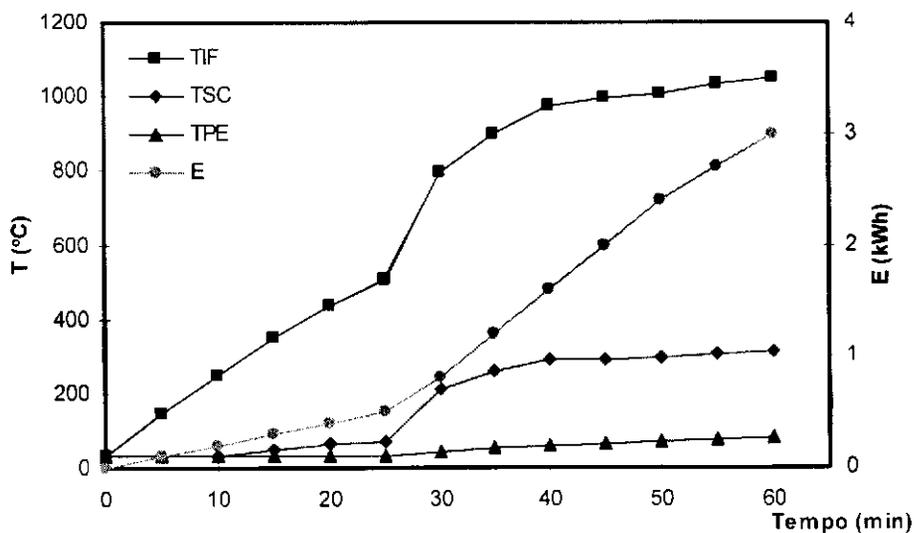


Figura 4.16 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da *terceira versão* do sistema de aquecimento. Temperatura final de TIF 1050°C (4ª batelada).

As Figuras 4.17 e 4.18 retratam os perfis de resfriamento do forno monitorado após o desligamento do maçarico. A análise foi realizada para o perfil de TIF de 1150°C com relação à segunda e terceira versão do sistema. A Tabela 4.4 apresenta os dados obtidos para o resfriamento do sistema durante o período de 1 hora. Observou-se que a diminuição do diâmetro da chaminé, realizada na terceira versão, resultou num ganho de eficiência térmica do sistema, sendo observado que a temperatura de TIF, durante os mesmos intervalos de tempo, é mais elevada para o sistema da terceira versão do que para o da segunda. Já em relação à temperatura de saída da chaminé, observa-se o mesmo ganho de eficiência, tendo-se registrado para os mesmos intervalos de tempo, temperaturas de TSC mais elevadas para o sistema da segunda versão. Este fato se traduz na maior retenção de calor no interior do forno da terceira versão do sistema de aquecimento.

Tabela 4.4 – Análise do Perfil de Resfriamento

Tempo (min)	Segunda Versão			Terceira Versão		
	TIF (°C)	TSC (°C)	TPE (°C)	TIF (°C)	TSC(°C)	TPE (°C)
0	1150	500	80	1150	355	90
40	490	200	122	540	102	138
60	400	177	116	450	94	132

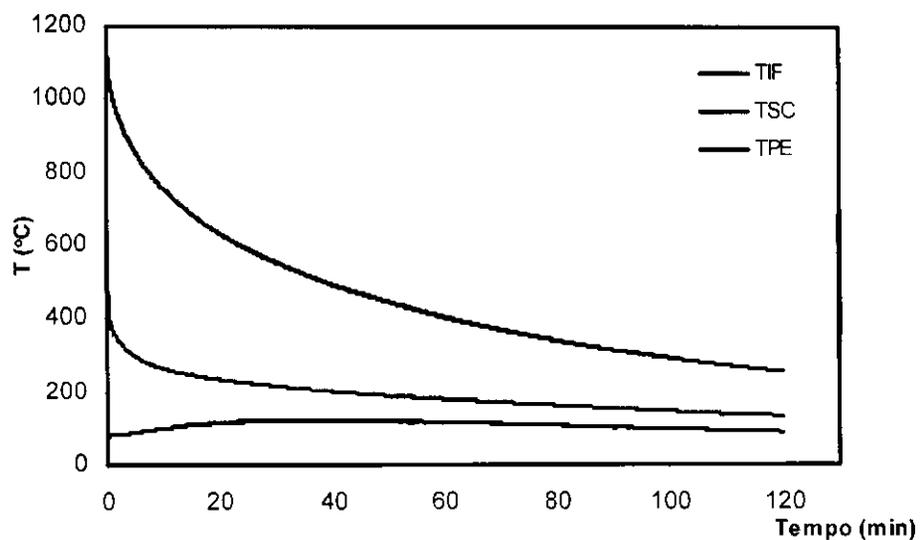


Figura 4.17 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1150°C), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) durante o resfriamento (segunda versão).

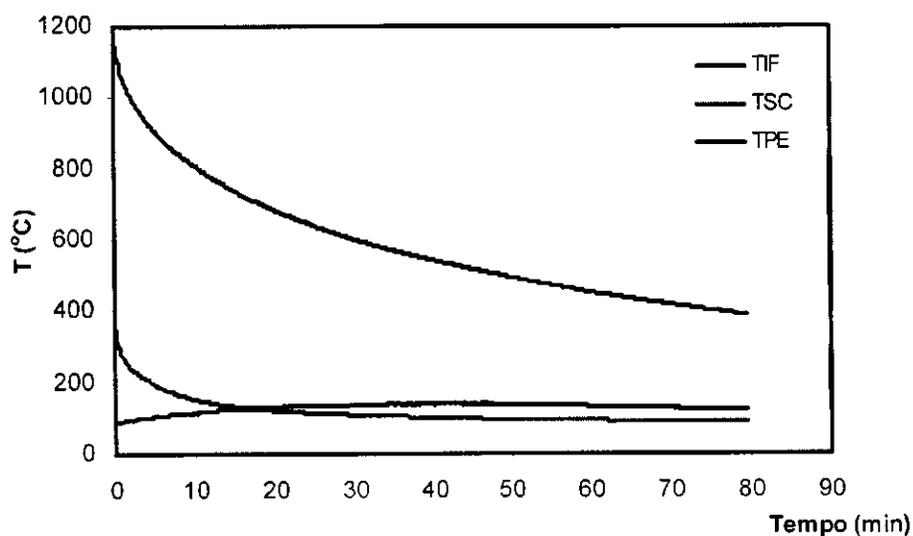


Figura 4.18 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1150°C), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) durante o resfriamento (terceira versão).

4.3.1.1 – Linhas de Tendência para os Perfis de Temperatura, Consumo de Energia e Consumo de Hidrogênio

A partir das linhas de tendência dos perfis de TIF, TSC, TPE, E e consumo de hidrogênio, é possível especificar, num determinado tempo, todas as variáveis analisadas durante o processo de aquecimento do sistema. Desta forma pode-se precisar neste tempo as temperaturas dos três perfis, bem como os consumos correspondentes de energia e hidrogênio.

Para realizar o estudo do comportamento das curvas, os perfis de temperatura foram divididos e analisados em duas fases: a primeira corresponde ao estágio de pré-aquecimento do forno, e a segunda correspondente à fase de estabelecimento final da temperatura.

Para cada perfil de queima foram realizados quatro experimentos, tendo sido traçadas suas correspondentes curvas, e os perfis médios de TIFM, TSCM e TPEM. As linhas de tendência correspondentes aos perfis médios foram simuladas para uma equação polinomial de sexto grau, pois este modelo apresentou melhor fator de correlação.

As Figuras 4.19 a 4.24, representam os perfis de TIF para as três temperaturas de aquecimento. As curvas traçadas com linhas contínuas são os perfis originais das quatro bateladas, bem com o perfil médio para TIF. A curva em linha pontilhada corresponde à linha de tendência traçada em relação ao perfil médio. Observa-se nas figuras a superposição de ambas as curvas, o que denota o desenvolvimento do perfil de TIF muito semelhante nas quatro bateladas. A linha de tendência traçada originou um fator de correlação bastante próximo de um, revelando que a equação do perfil médio é bastante representativa para os perfis de temperatura analisados. As equações das linhas de tendência estão apresentadas após cada figura.

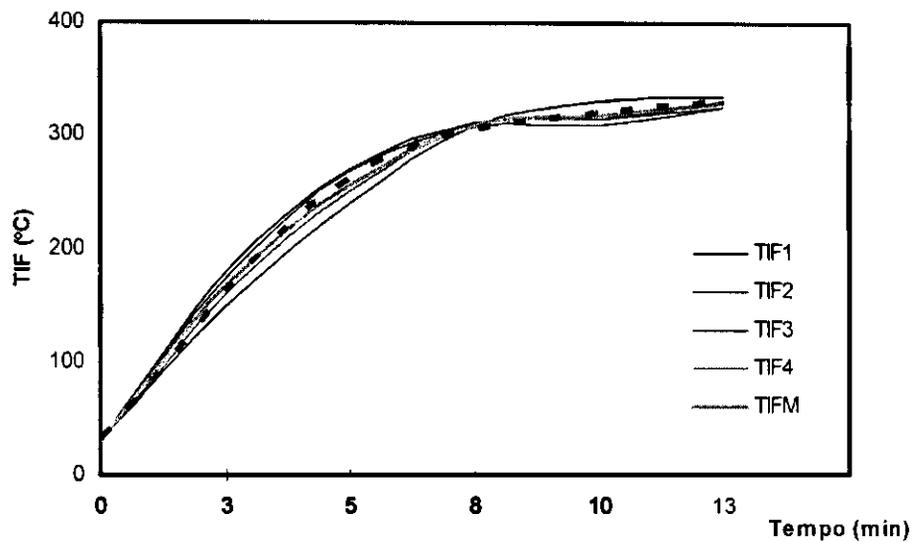


Figura 4.19 - Perfis de temperatura interna do forno ($TIF = 1150^{\circ}C$), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$TIFM = 0,1425x^6 - 3,187x^5 + 29,16x^4 - 136,48x^3 + 315,11x^2 - 204,08x + 30$$

$$R^2 = 0,9997$$

(4.1)

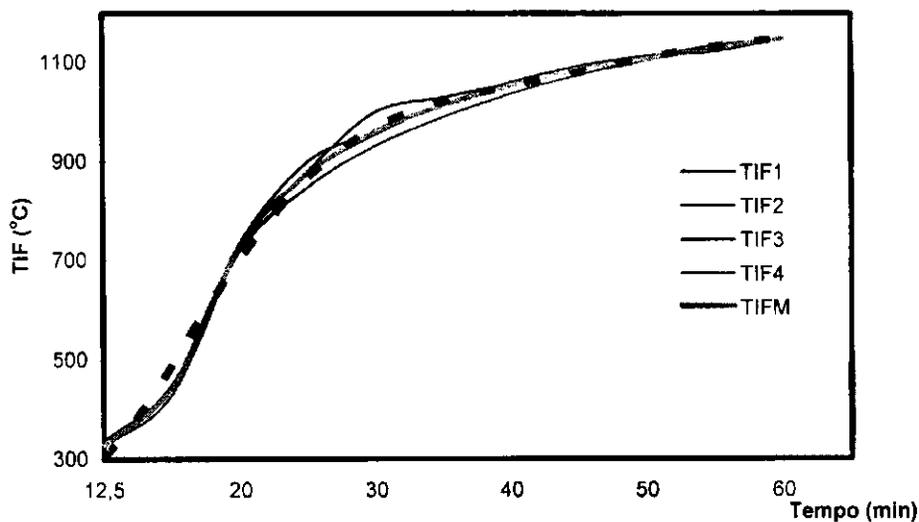


Figura 4.20 - Perfis de temperatura interna do forno ($TIF = 1150^{\circ}C$), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TIFM} = 0,0116x^6 - 0,5079x^5 + 8,6251x^4 - 70,339x^3 + 263,09x^2 - 226,19x + 329$$

$$R^2 = 0,9955$$

(4.2)

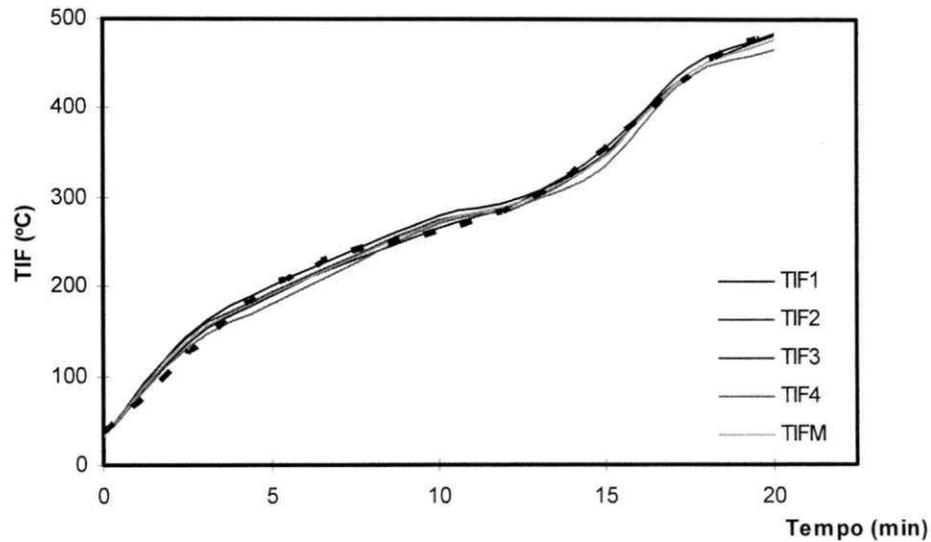


Figura 4.21 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1100°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TIFM} = 0,0047x^6 - 0,315x^5 + 5,6726x^4 - 41,693x^3 + 129,55x^2 - 86,234x + 31$$

$$R^2 = 0,9965$$

(4.3)

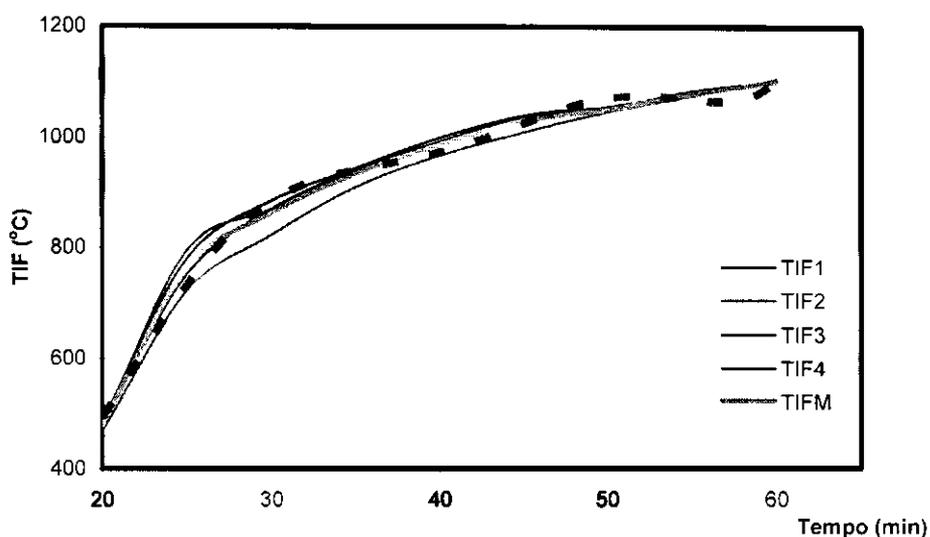


Figura 4.22 – Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1100°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TIFM} = 0,1206x^6 - 3,5409x^5 + 39,895x^4 - 213,15x^3 + 521,41x^2 - 329,88x + 478$$

$$R^2 = 0,9924$$

(4.4)

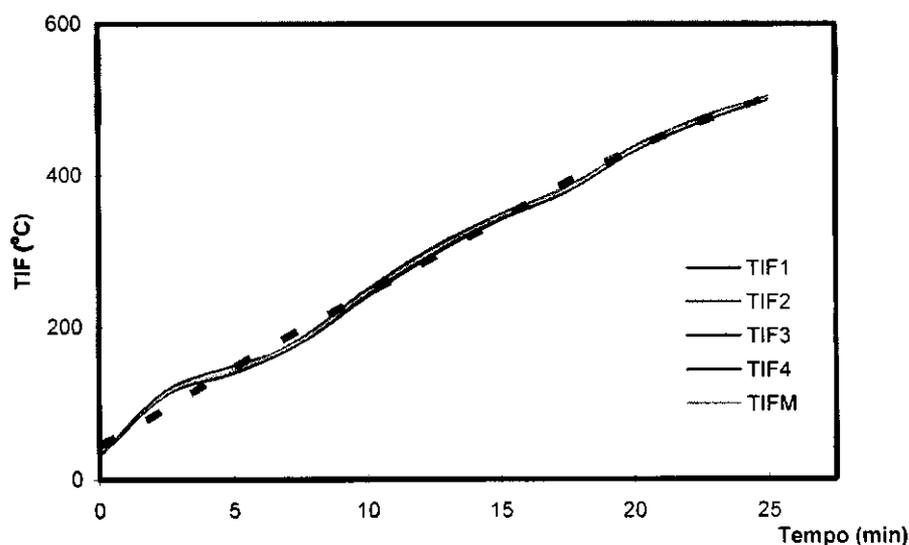


Figura 4.23 – Perfis de temperatura interna do forno (TIF = 1050°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TIFM} = 0,0042x^6 - 0,1507x^5 + 2,0862x^4 - 13,979x^3 + 46,493x^2 - 19,992x + 31$$

$$R^2 = 0,9956$$

(4.5)

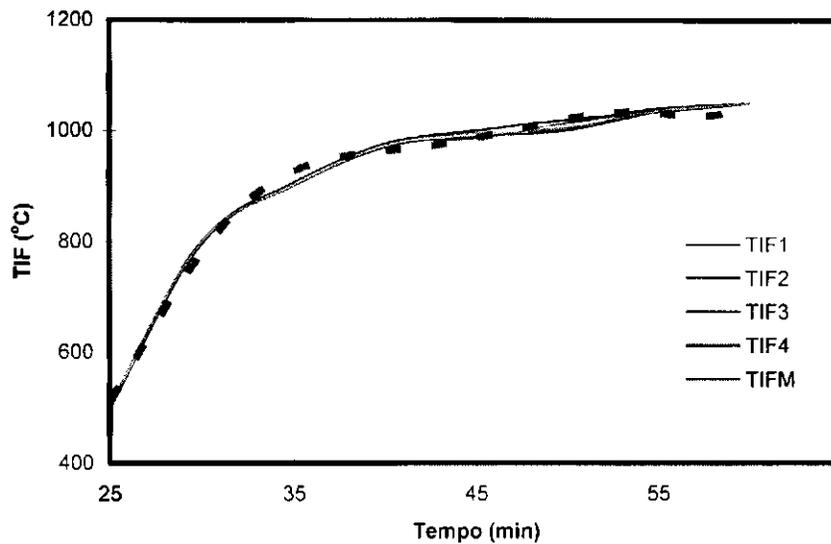


Figura 4.24 - Perfis de temperatura interna do forno ($\text{TIF} = 1050^{\circ}\text{C}$), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TIFM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TIFM} = 0,2098x^6 - 5,6832x^5 + 59,468x^4 - 297,05x^3 + 683,71x^2 - 432,86x + 503$$

$$R^2 = 0,9944$$

(4.6)

As Figuras 4.25 a 4.30, representam os perfis de TSC obtidos nas três temperaturas de aquecimento, para TIF de 1150°C , 1100°C e 1050°C . As curvas de traçado contínuo são os perfis originais e o perfil médio. A curva de traçado pontilhado corresponde à linha de tendência obtida do perfil de TSCM. As equações correspondentes a cada perfil são apresentadas após cada figura.

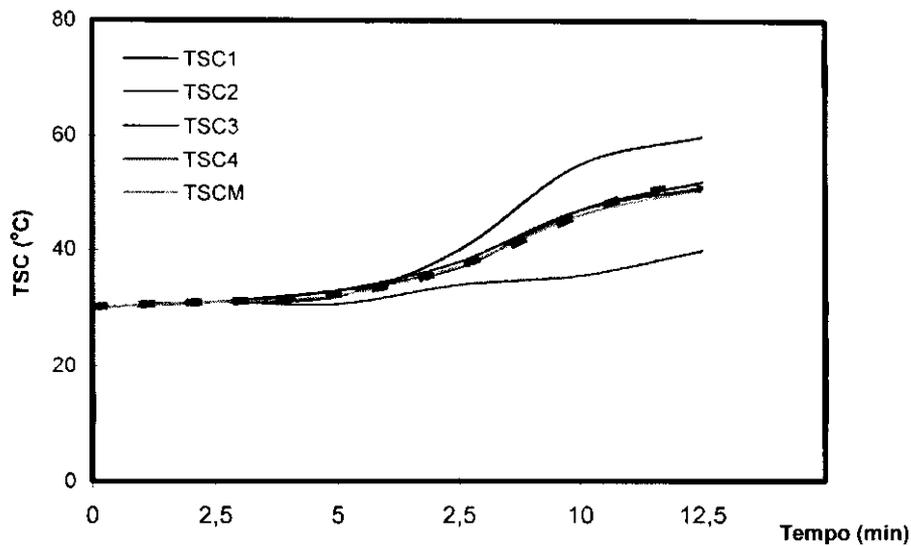


Figura 4.25 – Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1150°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$TSCM = 0,0258x^6 - 0,5123x^5 + 3,7523x^4 - 12,334x^3 + 18,266x^2 - 9,2572x + 30$$

$$R^2 = 0,9997$$

(4.7)

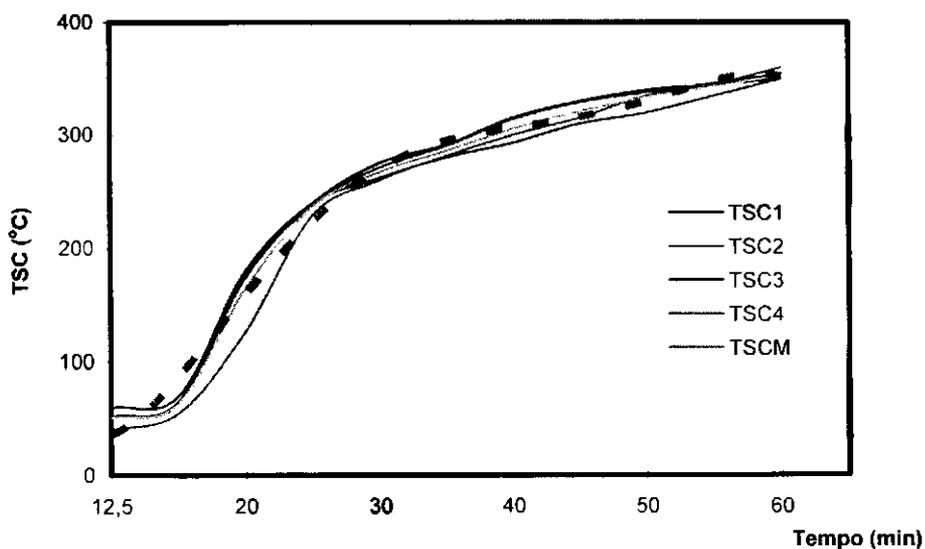


Figura 4.26 - Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1150°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TSCM} = -0,0011x^6 - 0,0028x^5 + 0,8361x^4 - 12,44x^3 + 64,863x^2 - 68,82x + 51$$

$$R^2 = 0,9904$$

(4.8)

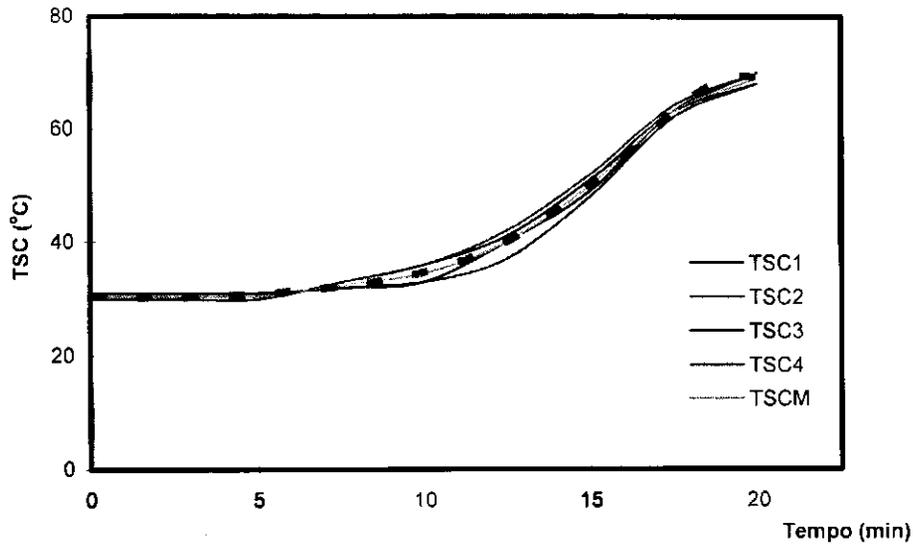


Figura 4.27 - Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1100°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\text{TSCM} = -0,0027x^6 + 0,0631x^5 - 0,5362x^4 + 2,1874x^3 - 4,117x^2 + 2,986x + 30$$

$$R^2 = 0,9998$$

(4.9)

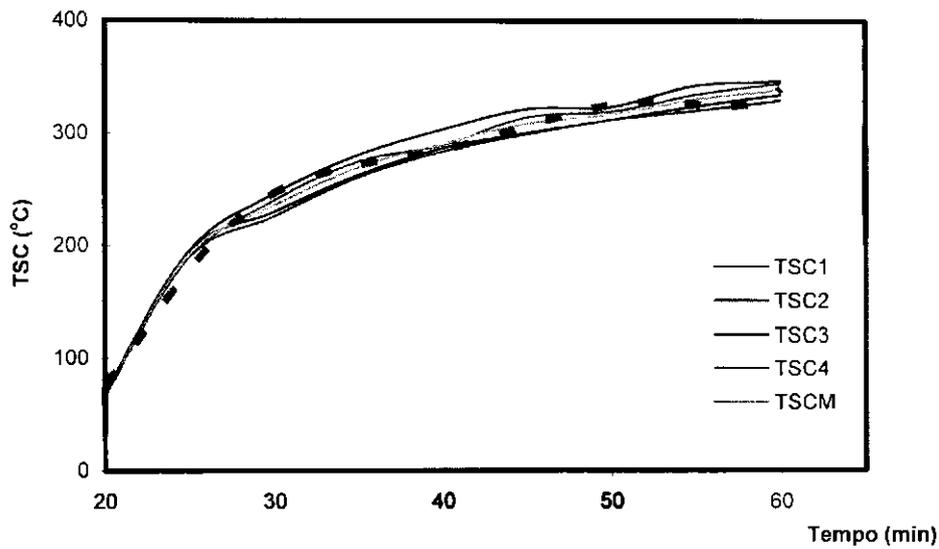


Figura 4.28 – Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1100°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$TSCM = 0,0494x^6 - 1,4597x^5 + 16,575x^4 - 89,331x^3 + 220,45x^2 - 139,48x + 69$$

$$R^2 = 0,9917$$

(4.10)

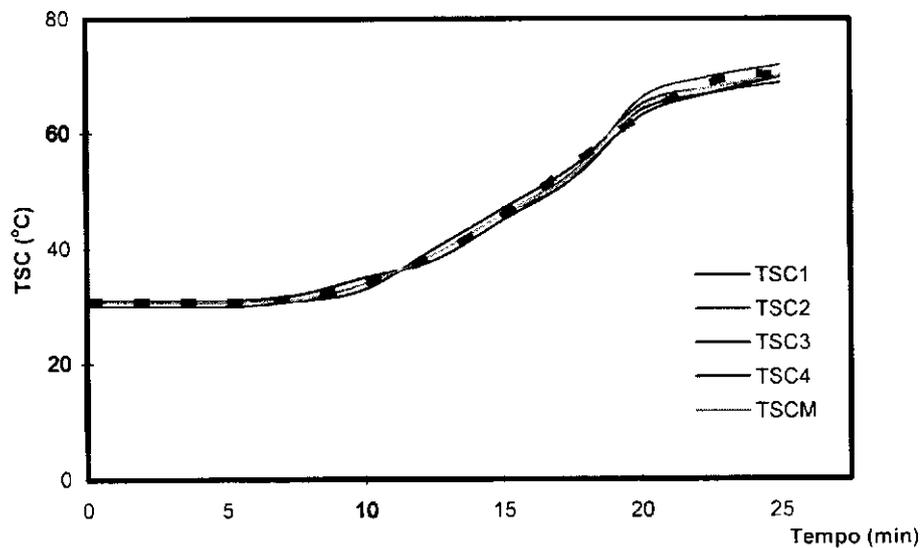


Figura 4.29 - Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1050°C), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\begin{aligned} \text{TSCM} &= 0,0002x^6 - 0,0096x^5 + 0,1192x^4 - 0,5352x^3 + 1,0363x^2 - 0,8805x + 31 \\ R^2 &= 0,9975 \end{aligned} \quad (4.11)$$

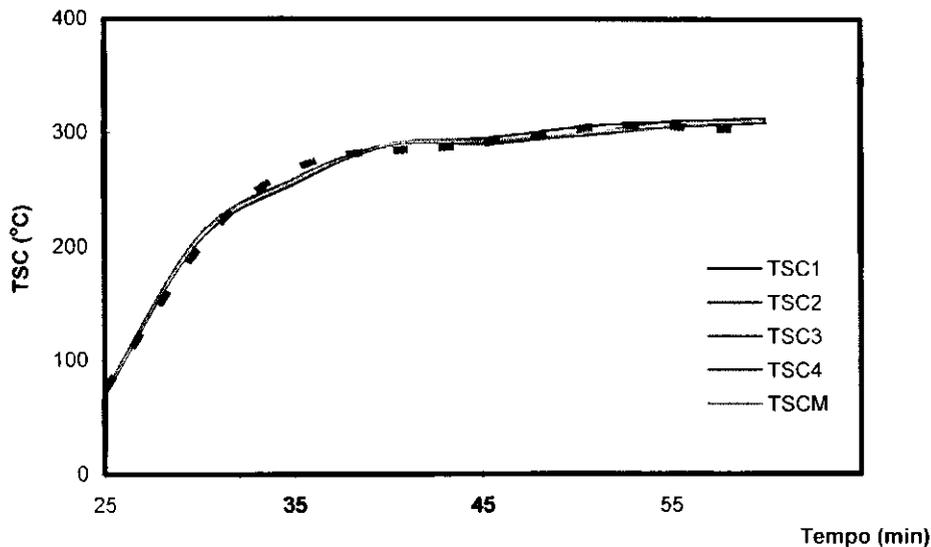


Figura 4.30 - Perfis de temperatura da saída da chaminé para (TIF = 1050°C), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TSCM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\begin{aligned} \text{TSCM} &= 0,0921x^6 - 2,5216x^5 + 26,682x^4 - 134,86x^3 + 313,57x^2 - 199,44x + 70 \\ R^2 &= 0,9948 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Para o perfil de temperatura da parede externa TPE estão apresentadas às equações das linhas de tendência apenas para TIF de 1150°C, já que para as temperaturas 1100°C e de 1050°C o desenvolvimento dos perfis foram idênticos. Desta forma, os resultados das equações podem, perfeitamente, serem estendidos para os demais perfis. As Figuras 4.31 e 4.32 representam os perfis de TPE para TIF de 1150°C, com suas correspondentes linhas de tendência. Para este caso, a primeira fase de aquecimento da parede foi representada por uma equação linear, que apresentou melhor fator de correlação.

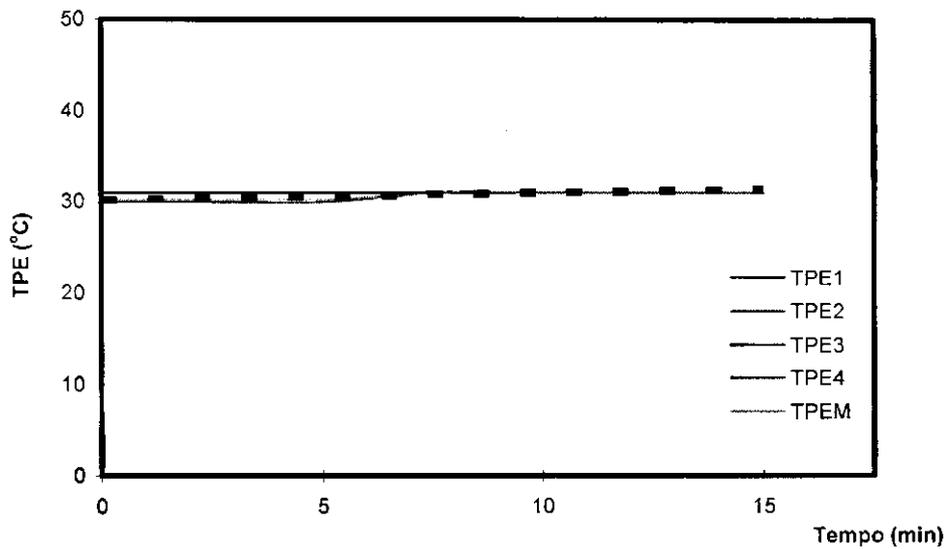


Figura 4.31 – Perfis de temperatura da parede externa para ($TIF = 1150^{\circ}C$), da primeira fase (pré-aquecimento), da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TPEM) e sua respectiva linha de tendência.

$$TPEM = 0,2x + 30$$

$$R^2 = 0,9998$$

(4.13)

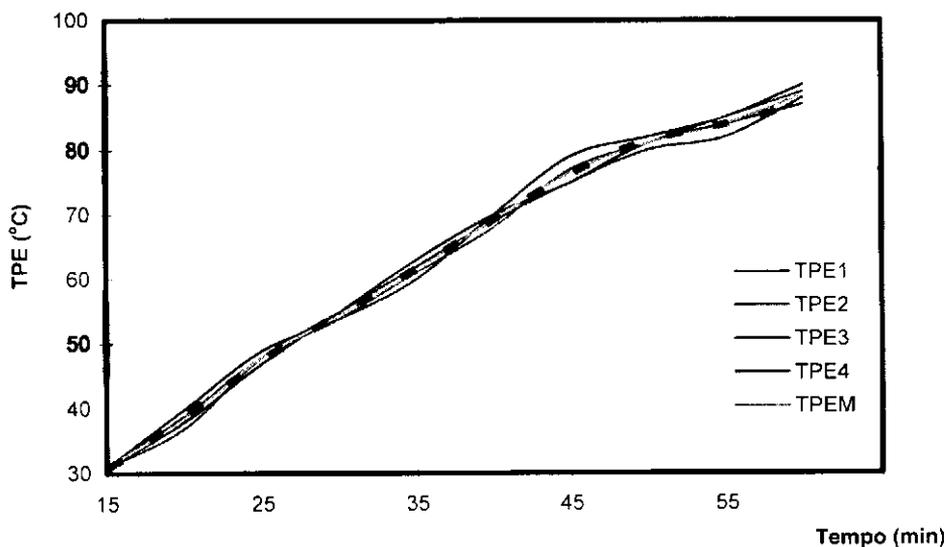


Figura 4.32 – Perfis de temperatura da parede externa para ($TIF = 1150^{\circ}C$), da segunda fase, da terceira versão do sistema de aquecimento, com o traçado do perfil médio (TPEM) e sua respectiva linha de tendência.

$$\begin{aligned} \text{TPEM} &= 0,0022x^6 - 0,0697x^5 + 0,8306x^4 - 4,7997x^3 + 13,752x^2 - 9,9103x + 31 \\ R^2 &= 0,9998 \end{aligned} \quad (4.14)$$

As Figuras 4.33 e 4.34 retratam, respectivamente, os perfis médios do consumo de energia e hidrogênio obtidos em cada grupo de bateladas para as três de temperaturas de queima. Observa-se que no início os três perfis se superpõem, sendo modificados após a fase de pré-aquecimento do forno. Após esta fase, os consumos de energia e hidrogênio aumentam com o aumento da temperatura de aquecimento.

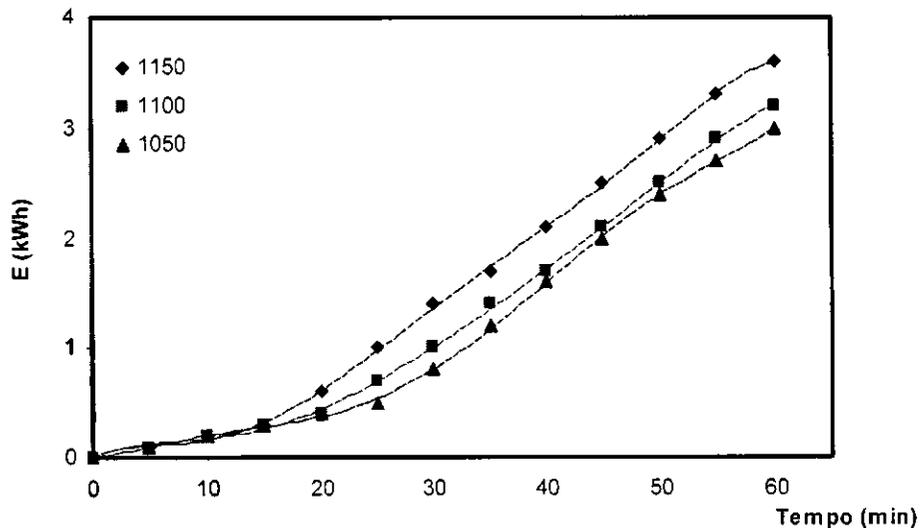


Figura 4.33 – Perfis dos consumos de energia (E) da terceira versão do sistema de aquecimento para (TIF) de 1150°C, 1100°C e 1050°C.

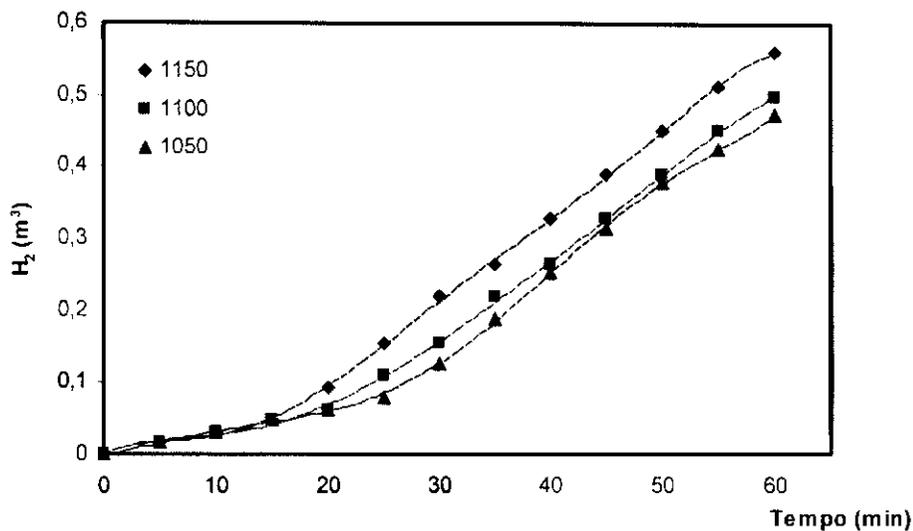


Figura 4.34 – Perfis dos consumos de hidrogênio (H_2) da terceira versão do sistema de aquecimento para (TIF) de 1150°C, 1100°C e 1050°C.

As Figuras 4.35 e 4.36 representam o comportamento das linhas de tendências para o consumo de energia, durante a fase de pré-aquecimento do forno e a fase de estabelecimento final da temperatura. A análise é relativa à temperatura de aquecimento de 1150°, podendo ser estendida para as demais temperaturas, por apresentarem comportamento semelhante. Durante a fase de pré-aquecimento, o eletrolisador consome em média 0,1 kWh de energia a cada cinco minutos, caracterizando para esta fase, comportamento linear durante o desenvolvimento do perfil. Já para a segunda fase, o eletrolisador consome em média de 0,37 kWh de energia a cada cinco minutos. Da mesma forma que a anterior, esta fase apresenta comportamento linear durante o desenvolvimento do perfil da curva de consumo de energia. O perfil traçado com linha contínua representa a curva original, e o com linha tracejada representa o perfil da linha de tendência. As equações representativas dos perfis estão apresentadas após cada figura. A equação 4.15 representa a equação modelo de consumo de energia para o fluxo baixo de hidrogênio e a equação 4.16 para o fluxo alto de hidrogênio.

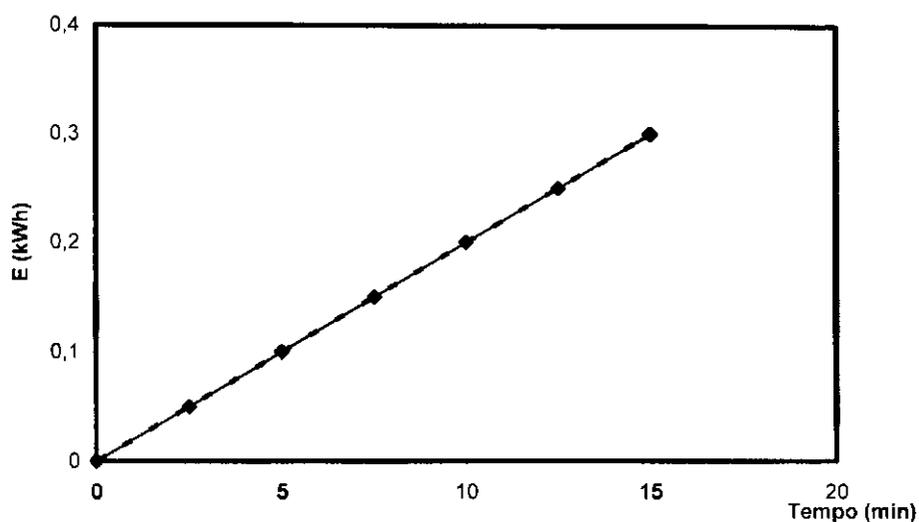


Figura 4.35 – Comportamento do desenvolvimento do perfil do consumo de energia da fase de pré-aquecimento do forno para (TIF) de 1150°C (terceira versão).

$$E = 0,02x$$

$$R^2 = 1$$

(4.15)

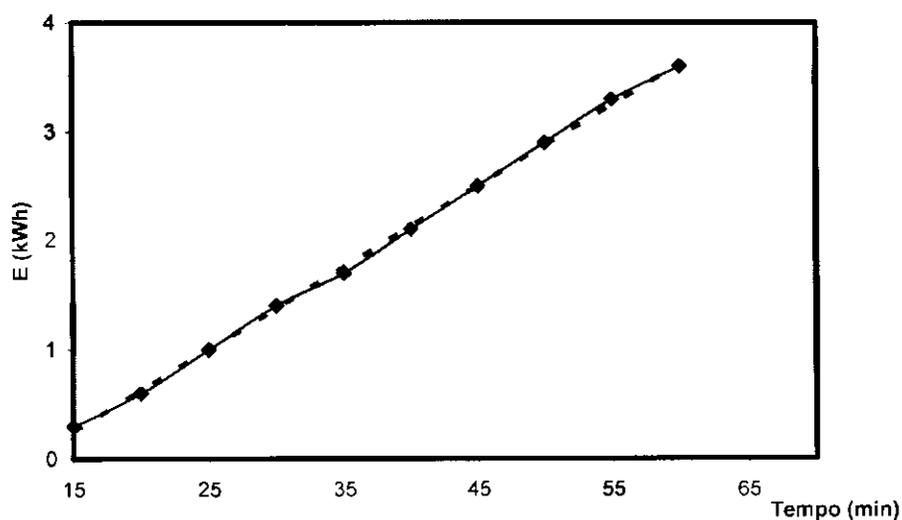


Figura 4.36 – Comportamento do desenvolvimento do perfil do consumo de energia da segunda fase de aquecimento do forno para (TIF) de 1150°C (terceira versão).

$$E = 0,0749x - 0,8691$$

$$R^2 = 0,9991$$

(4.16)

4.3.1.2 – Caracterização da Argila para Aplicação em Revestimento Cerâmico

Em cada batelada foi realizada a queima de seis corpos de provas e determinadas suas características físicas após a sinterização nas três temperaturas de queima.

Após a sinterização, os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios tecnológicos: Absorção de Água (Abs), Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA), Retração Linear de Queima (RLQ), Perda ao Fogo (PF) e Módulo de Resistência a Flexão (MRF). Os resultados obtidos foram comparados com os valores especificados na norma da ABNT NBR 13818 (1997). Os valores das caracterizações estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Caracterização da argila para revestimento cerâmico

T (°C)	Abs (%)	MEA (g/cm ³)	PA (%)	RLQ (%)	PF (%)	MRF (MPa)
1050	10,42	1,90	18,25	-0,07	7,11	10,95
1100	9,25	1,95	18,02	-0,21	7,84	18,28
1150	6,61	1,91	12,49	-1,36	9,77	20,13

Analisando os resultados obtidos, as amostras de argila queimadas nas temperaturas de 1100°C e 1150°C podem ser classificadas com sendo um material semiporoso (Grupo CII), por apresentarem tensão de ruptura a flexão entre 18 MPa e 30 MPa e absorção de água entre 6 e 10%. Para a temperatura de 1050°C as amostras ficaram fora dos limites de classificação, de onde se pode concluir que esta temperatura não é ideal para o processo de queima.

A Figura 4.37 ilustra o aspecto dos corpos de provas utilizados no processo de queima. As amostras numeradas de 23-28 na parte superior da figura são corpos de provas confeccionados através do processo de laminação, os quais foram estudados visando a sua aplicação em produtos de revestimento cerâmico. As amostras com numeração de 26-30 na parte inferior da figura, foram obtidas através do processo de prensagem, visando a sua aplicação para a produção de material de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas.

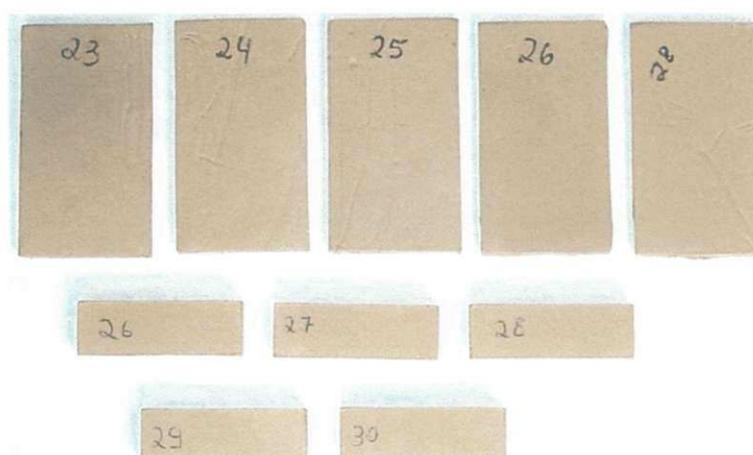


Figura 4.37 – Ilustração dos corpos de prova antes do processo de queima.

As Figuras 4.38 a 4.40 ilustram os corpos de provas queimados nas temperaturas estudadas. Visualmente, após a queima nos três perfis de temperatura, não se percebe nenhuma diferença significativa no aspecto das peças. A diferença da qualidade das peças foi observada através dos ensaios tecnológicos realizados nos corpos de prova, mostrado na Tabela 4.5.

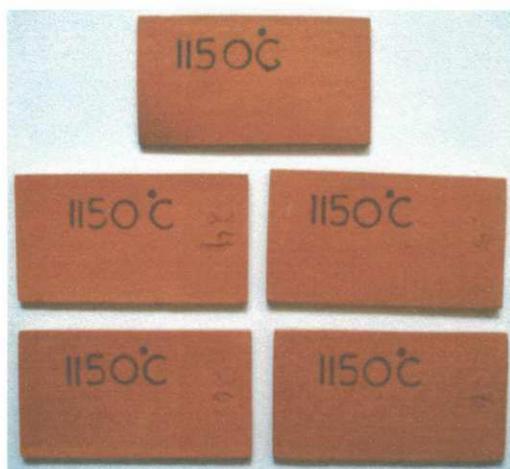


Figura 4.38 – Peças queimadas a 1150°C

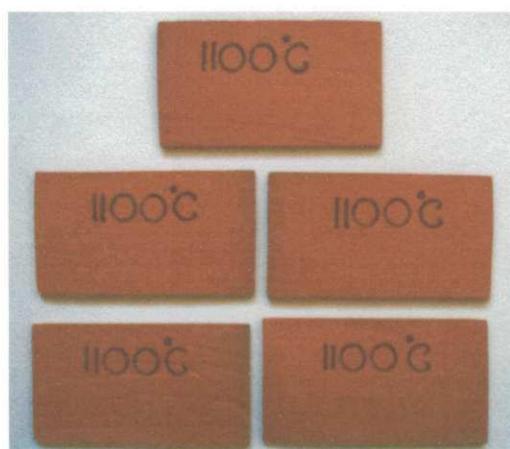


Figura 4.39 – Peças queimadas a 1100°C

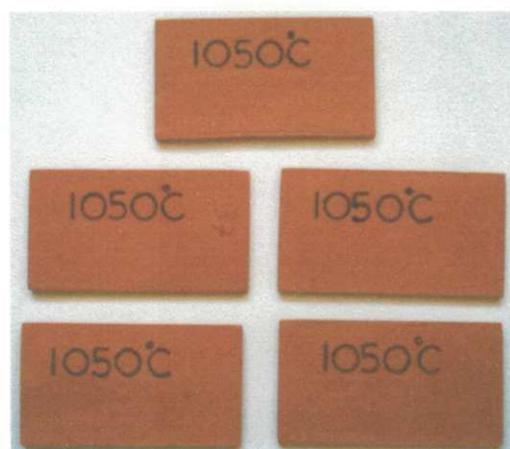


Figura 4.40 – Peças queimadas a 1050°C

A Figura 4.41 ilustra o aspecto de peças queimadas a 1200°C, sendo observada a super queima das amostras, através da coloração escura apresentada após o processo. Observa-se ainda que as peças ficaram bastante empenadas próximo às suas extremidades. Estas características revelam que esta temperatura não é ideal para processo de queima das amostras, pois acarretaria na produção de um produto final defeituoso.

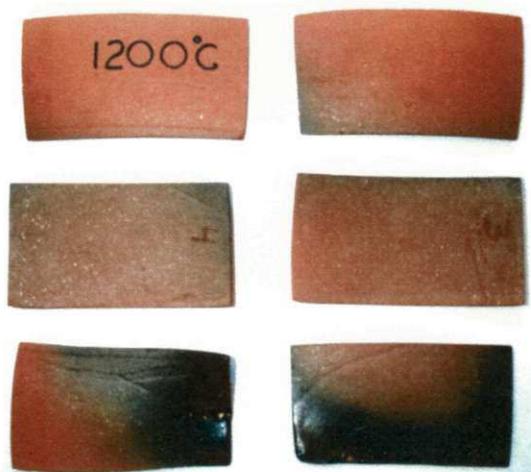


Figura 4.41 – Peças queimadas a 1200°C

4.3.2 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Olaria

A aplicação do sistema de aquecimento para fornos de olaria foi estudada para temperatura de queima de 900°C em dois períodos de tempo diferentes: um de 45 minutos e outro de 60 minutos. As Figuras 4.42 e 4.43 ilustram a média obtida desses perfis. Como no caso anterior da avaliação do sistema para fornos de revestimento cerâmico, o forno para o caso em foco também apresenta duas fases distintas. A primeira corresponde à fase de pré-aquecimento, que varia em função do tempo da batelada, e a segunda corresponde à fase de estabelecimento final da temperatura desejada.

A Figura 4.42 representa o perfil em que a temperatura de queima é alcançada aos 45 minutos. Para este caso, a primeira fase se estende até os 25 minutos, onde as temperaturas de TIF e TSC atingem em média 360°C e 60°C, respectivamente. Dos 25 aos 35 minutos o sistema registra a maior taxa de aquecimento, chegando a alcançar em média 755°C e 185°C para TIF e TSC, respectivamente. No final da batelada o sistema chegou a atingir em média 243°C e 58°C para TSC e TPE. A curva E durante a primeira fase apresenta em média a cada cinco minutos 0,1 kWh de consumo de energia; na segunda fase passa a consumir 0,3 kWh, consumindo no final do experimento 1,7 kWh.

A figura 4.43 representa o perfil em que a TIF é alcançada aos 60 minutos. Para este caso, a fase de pré-aquecimento do forno se prolonga até os 40 minutos, sendo registradas, em média, para TIF e TSC as temperaturas de 500°C e 72°C, respectivamente. Dos 40 aos 45 minutos o forno registra a maior taxa de aquecimento, chegando a atingir em média para TIF 757°C e TSC 181°C. No final do aquecimento o forno atinge em média 230°C e 65°C para TSC e TPE. Como no caso anterior, durante a primeira fase de aquecimento, o sistema consome em média 0,1 kWh de energia a cada cinco minutos; na segunda fase passa a consumir em média 0,3 kWh, chegando a consumir 2,1 kWh no final do experimento.

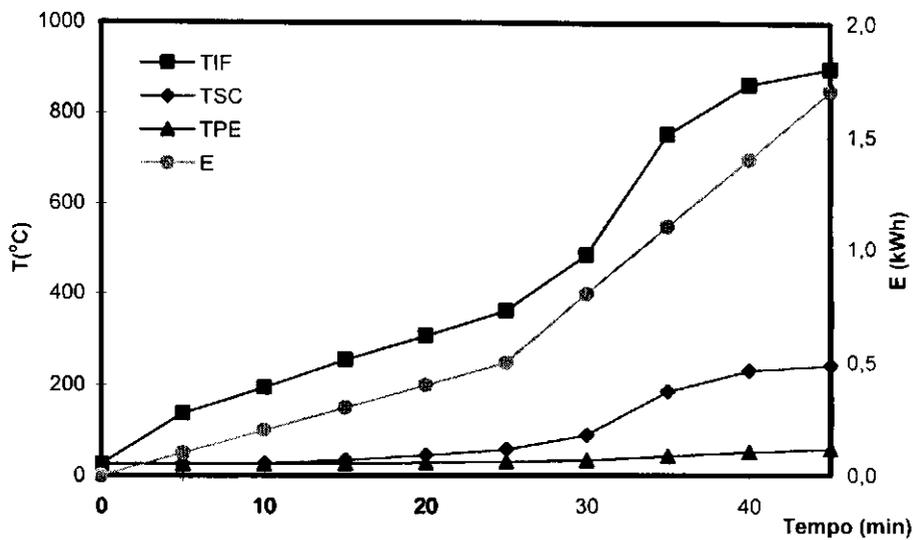


Figura 4.42 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da terceira versão do sistema, aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 45 minutos.

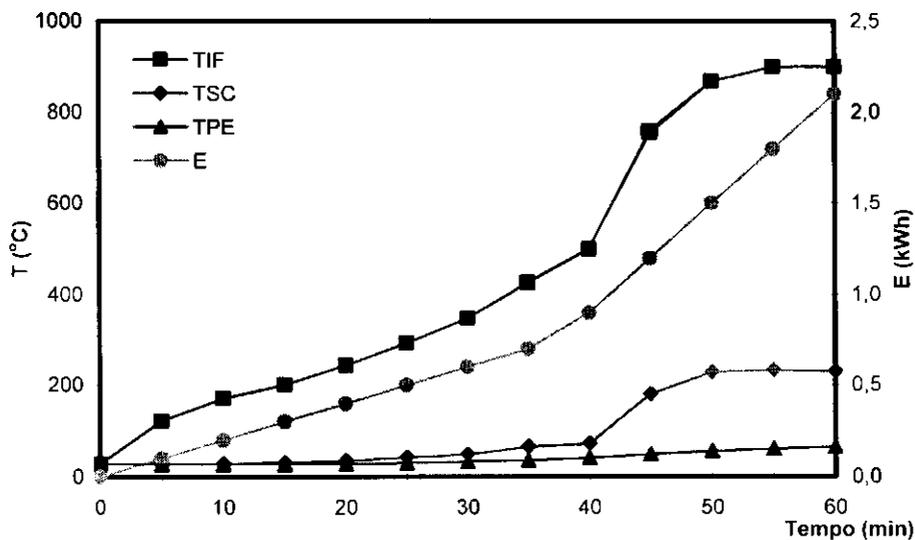


Figura 4.43 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E) da terceira versão do sistema, aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 60 minutos.

As Figuras 4.44 a 4.47 representam os perfis de aquecimento de TIF, TSC e TPE com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, representadas pelas curvas pontilhadas. A análise das linhas de tendência foi feita com relação à primeira e à segunda fase de desenvolvimento dos perfis de aquecimento. As equações representativas de cada perfil estão apresentadas após cada figura.

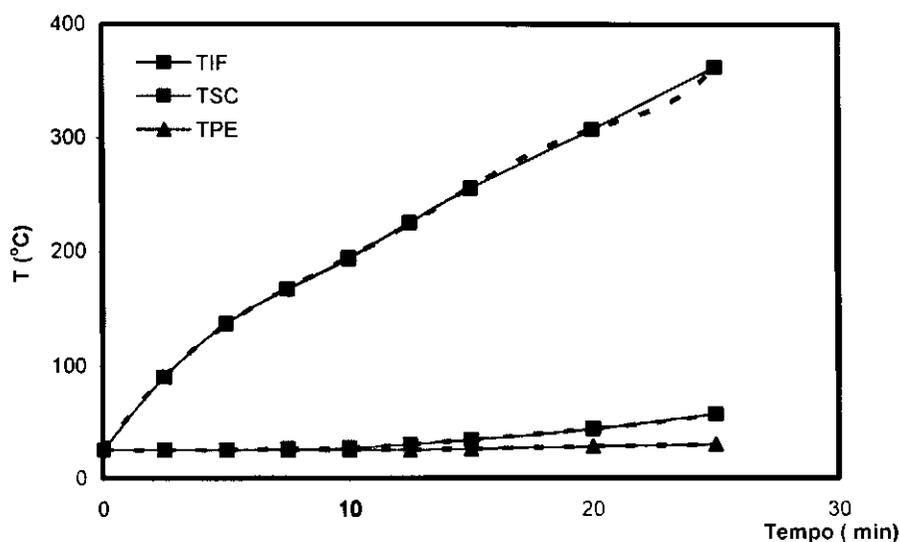


Figura 4.44 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (fase de pré-aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 45 minutos.

$$\text{TIF} = 2 \cdot 10^{-5} x^6 - 0,0015x^5 + 0,0315x^4 - 0,215x^3 - 1,0374x^2 + 29,687x + 25$$

$$R^2 = 1$$
(4.17)

$$\text{TSC} = 2 \cdot 10^{-6} x^6 - 0,0001x^5 + 0,0032x^4 - 0,0299x^3 + 0,1395x^2 - 0,2349x + 25$$

$$R^2 = 0,9999$$
(4.18)

$$\text{TPE} = 1 \cdot 10^{-6} x^6 - 1x10^{-4} x^5 + 0,0026x^4 - 0,0295x^3 + 0,1443x^2 - 0,2309 + 25$$

$$R^2 = 0,9979$$
(4.19)

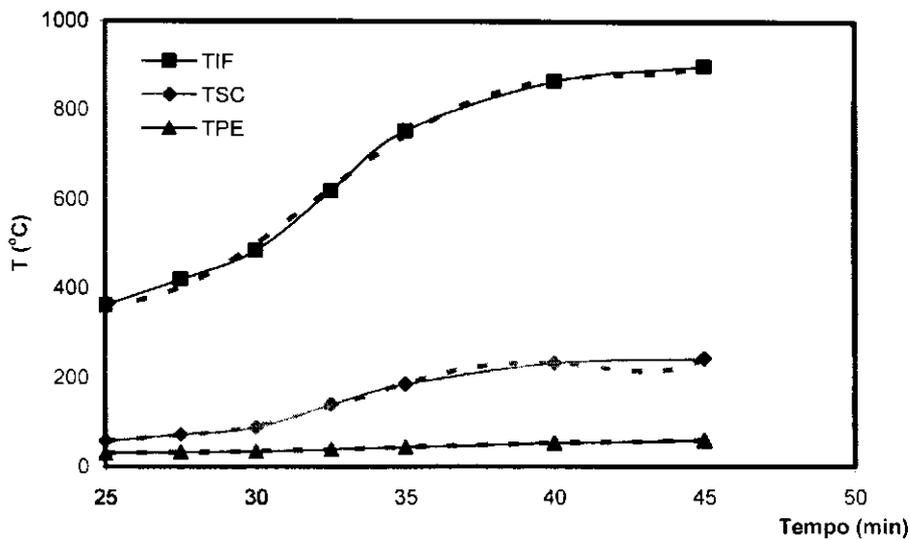


Figura 4.45 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (segunda fase de aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 45 minutos.

$$\begin{aligned} \text{TIF} &= 0,0006x^5 - 0,0807x^4 + 4,2891x^3 - 97,956x^2 - 812,85x + 362 \\ R^2 &= 0,9974 \end{aligned}$$

(4.20)

$$\begin{aligned} \text{TCS} &= 4 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,0065x^5 + 0,4266x^4 - 13,851x^3 + 221,62x^2 - 1400,9x + 57 \\ R^2 &= 0,9989 \end{aligned}$$

(4.21)

$$\begin{aligned} \text{TPE} &= 8 \cdot 10^{-7}x^6 - 0,0001x^5 + 0,0093x^4 - 0,2972x^3 + 4,6392x^2 - 28,615x + 30 \\ R^2 &= 0,9990 \end{aligned}$$

(4.22)

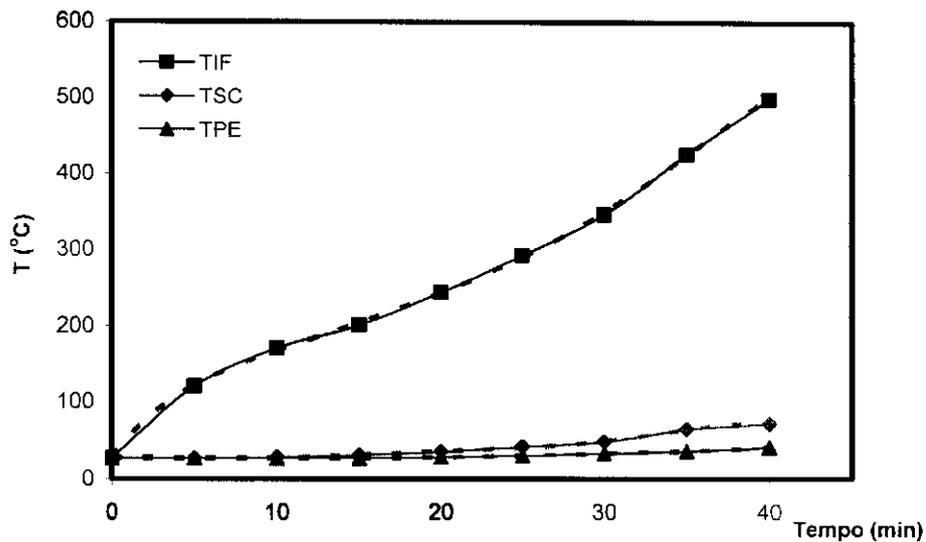


Figura 4.46 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (fase de pré-aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 60 minutos.

$$TIF = -1 \cdot 10^{-6} x^6 + 0,0001 x^5 - 0,0069 x^4 + 0,189 x^3 - 2,8523 x^2 + 29,328 x + 27$$

$$R^2 = 0,9998 \quad (4.23)$$

$$TSC = -7 \cdot 10^{-7} x^6 + 8 \cdot 10^{-5} x^5 - 0,0034 x^4 + 0,0637 x^3 - 0,51 x^2 + 1,3902 x + 27$$

$$R^2 = 0,9976 \quad (4.24)$$

$$TPE = 1 \cdot 10^{-7} x^6 - 1 \cdot 10^{-5} x^5 + 0,0005 x^4 - 0,0083 x^3 + 0,0608 x^2 - 0,1503 x + 27$$

$$R^2 = 0,9999 \quad (4.25)$$

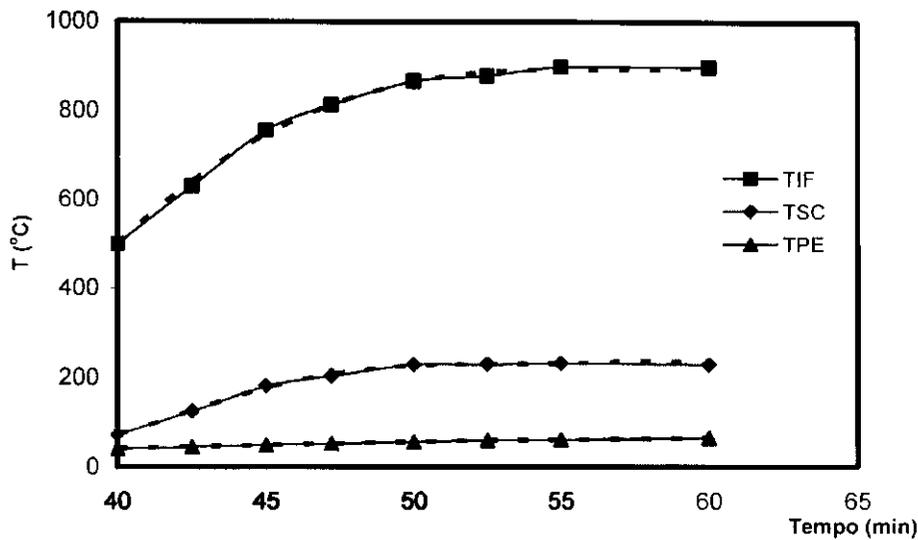


Figura 4.47 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE), com o traçado de suas respectivas linhas de tendência, da terceira versão do sistema (segunda fase de aquecimento) aplicado para fornos de olaria (TIF = 900°C). Tempo final de 60 minutos.

$$\begin{aligned} \text{TIF} &= 3 \cdot 10^{-5} x^6 + 0,008x^5 - 0,788x^4 + 38,407x^3 - 925,84x^2 + 8818,6x + 500 \\ R^2 &= 0,9994 \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \text{TSC} &= -1 \cdot 10^{-5} x^6 + 0,0032x^5 - 0,3182x^4 + 15,673x^3 - 381,72x^2 + 3672,9x + 72 \\ R^2 &= 0,9988 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \text{TPE} &= 6 \cdot 10^{-7} x^6 - 0,0001x^5 + 0,0136x^4 - 0,6579x^3 + 15,945x^2 - 155,02x + 41 \\ R^2 &= 0,9999 \end{aligned} \quad (4.28)$$

As Figuras 4.48 e 4.49 retratam o perfil do consumo de energia e hidrogênio para as temperaturas anteriormente analisadas. Observa-se que os perfis, para ambos os casos, apresentam comportamento semelhante. As curvas na primeira fase se superpõem. Após esta fase, os perfis se desenvolvem de forma a atingir TIF 900°C em tempos deferentes. Para o tempo final de 45 minutos foram consumidos, em média, 1,7 kWh de energia e 0,26 m³ de hidrogênio. Já para o perfil obtido aos 60 minutos, foram consumidos em média 2,1 kWh de energia e 0,31 m³ de hidrogênio.

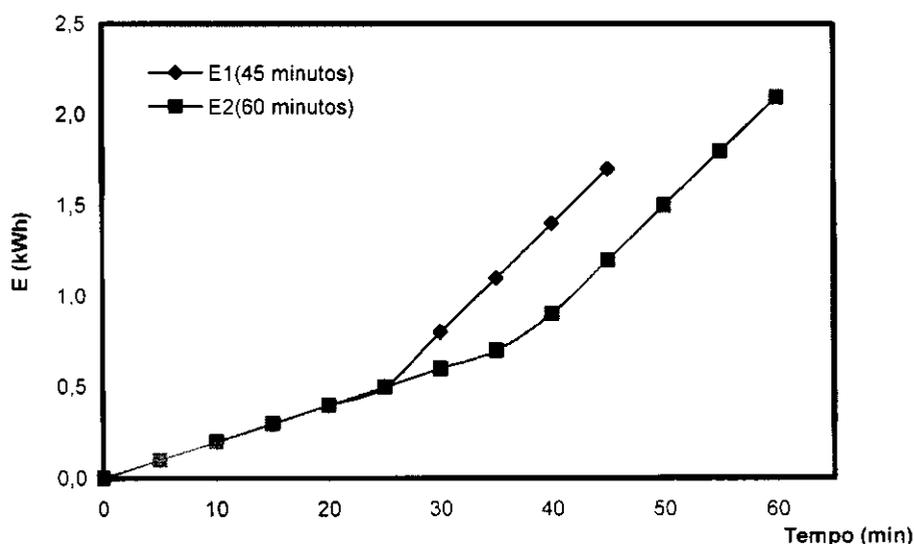


Figura 4.48 – Perfis do consumo de energia para TIF 900°C.

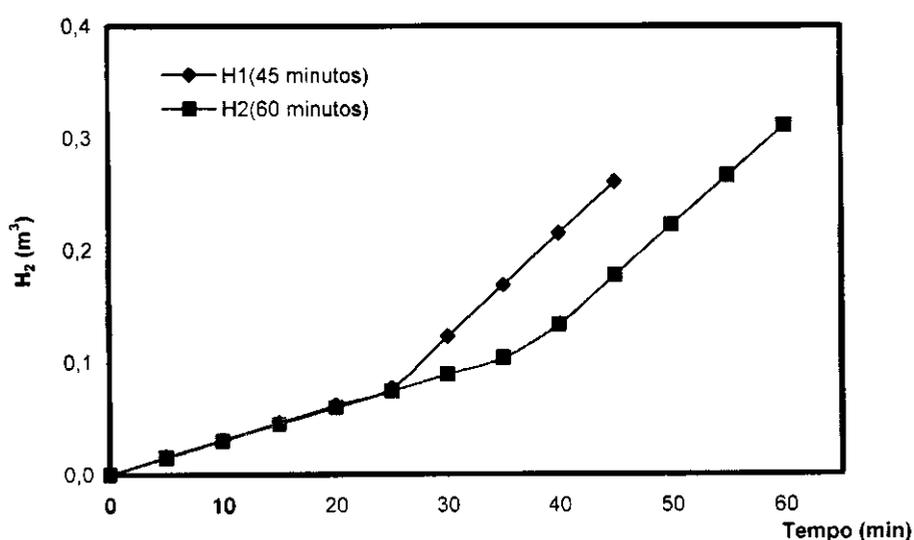


Figura 4.49 – Perfis do consumo de hidrogênio para TIF 900°C

As Figuras 4.50 e 4.51 representam o comportamento da linha de tendência do consumo de energia analisado durante a primeira e a segunda fase de aquecimento do forno, sendo observado comportamento linear durante o desenvolvimento de cada perfil. O caso em análise corresponde ao tempo de aquecimento de uma hora. As equações correspondentes estão apresentadas após cada figura. A equação 4.29 representa a equação modelo para o fluxo baixo de consumo de hidrogênio e a equação 4.30 para o fluxo alto de consumo de hidrogênio. Análise semelhante pode ser estendida para o tempo de aquecimento de quarenta e cinco minutos, bem como, para o consumo de hidrogênio. A Tabela 4.6 apresenta o consumo de energia e hidrogênio.

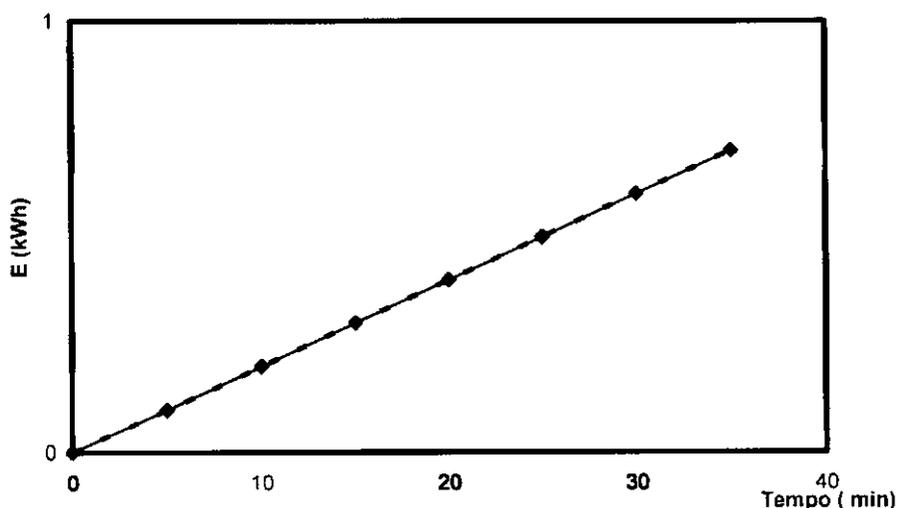


Figura 4.50 – Perfil da linha de tendência do consumo de energia para a primeira fase de aquecimento, correspondente a TIF de 900 °C.

$$E = 0,02x$$

$$R^2 = 1$$

(4.29)

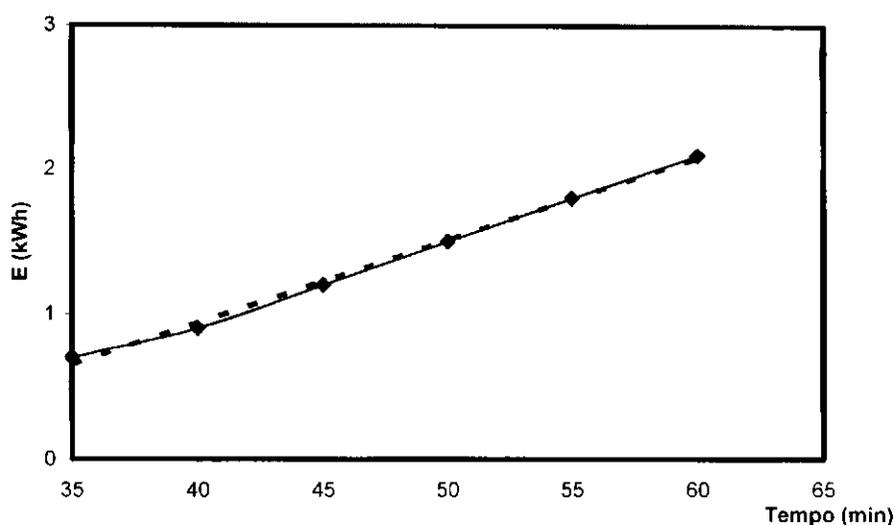


Figura 4.51 – Perfil da linha de tendência do consumo de energia para a segunda fase de aquecimento, correspondente a TIF de 900 °C.

$$E = 0,0571x - 1,3476$$

$$R^2 = 0,9967$$

(4.30)

Tabela 4.6 – Consumo de Hidrogênio e Energia

Tempo(min)	H ₂ O (L)	E (kWh)	V. Teórico	V.Pratico	Erro (%)
			H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)	
45	0,21	1,7	0,256	0,261	1,95
60	0,25	2,1	0,316	0,311	1,58

4.3.2.1 – Caracterização da Argila para Aplicação em Cerâmica Vermelha

Para a caracterização da argila visando a sua possível aplicação em cerâmica vermelha, foram realizados nos corpos de prova, logo após a queima, os seguintes ensaios tecnológicos. Absorção de Água (Abs), Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA), Retração Linear de

Queima (RLQ), Perda ao Fogo (PF) e Módulo de Resistência a Flexão (MRF). Os resultados obtidos foram comparados com os valores especificados por SOUZA SANTOS,1992 (Tabela 2.6). Os valores das caracterizações estão apresentados na Tabela 4.7

Tabela 4.7 – Caracterização da argila para cerâmica vermelha

Tempo (min)	Abs (%)	MEA (g/cm³)	PA (%)	RLQ (%)	PF (%)	MRF (MPa)
45	1,29	1,99	2,44	-0,01	11,15	9,13
60	1,38	2,34	3,44	-0,03	9,21	9,27
E	≤25,00	≥1,70	≤35,00	-	-	≥6,00

E - Especificação

Os processos de queima para produção de tijolos e telhas nas olarias apresentam período de duração de 8 a 10 horas, o que se traduz em elevado consumo de lenha, óleo diesel ou gás natural. Utilizando-se o hidrogênio como combustível, as amostras de argilas foram queimadas em tempos consideravelmente menores aos utilizados pela indústria. Esta característica pode ser atribuída ao fato do hidrogênio possuir poder calorífico aproximadamente 10 vezes superior à lenha e 3 vezes maior em relação aos combustíveis derivados do petróleo.

Para a liberação da mesma quantidade de calor, utilizando-se lenha, seria necessária uma quantidade em massa de combustível bem maior do que a estimada com base nos respectivos poderes caloríficos da lenha e do hidrogênio. Este fator está relacionado com a eficiência da combustão do hidrogênio, que possibilita um tempo de queima consideravelmente menor do que o da lenha; isto se converte em economia na quantidade em massa que o hidrogênio utiliza para liberar a quantidade de calor necessária para queima de determinado produto.

O poder calorífico, a eficiência de combustão e o controle eficiente da mistura combustível H_2/O_2 , são os principais fatores que determinam a melhor qualidade do processo de combustão utilizando hidrogênio eletrolítico como combustível. Este processo mais eficiente de combustão se converte em menores tempos de queima, menor consumo de combustível e qualidade superior dos produtos queimados, já que os mesmos não sofrem o ataque dos agentes nocivos, por exemplo, presentes no resultado da combustão dos combustíveis de origem orgânica.

4.3.3 – Avaliação do Sistema para Aplicação em Fornos de Padaria

A avaliação do sistema de aquecimento foi realizada através do estudo do perfil de TIF a $300^\circ C$, durante um intervalo de tempo de duas horas. Neste sentido, o perfil de aquecimento foi também dividido em duas fases: primeira fase, onde ocorreu a fase de pré-aquecimento do forno, controlado de tal forma que a TIF ascende até $300^\circ C$ em um tempo médio de 40 minutos; segunda fase, onde o perfil de TIF já estabelecido foi mantido constante até o tempo final de 2 horas. A Figura 4.52 retrata uma média do perfil em análise; os perfis de TSC, TPE e E possuem suas respectivas linhas de tendência tracejada, não sendo visíveis por praticamente se superporem às curvas originais. Para o perfil de TIF, a linha de tendência foi traçada até os 40 minutos; a partir deste ponto o perfil pode ser considerado constante. As Equações 4.31 a 4.34 representam as respectivas linhas de tendência.

$$\begin{aligned} TIF &= 0,0386x^6 - 1,1739x^5 + 13,851x^4 - 78,5x^3 + 206,06x^2 - 138,19x + 30 \\ R^2 &= 0,9989 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$TSC = 1 \cdot 10^{-5} x^6 - 0,0009x^5 + 0,0267x^4 - 0,3761x^3 + 2,3746x^2 - 3,1462x + 28$$

$$R^2 = 0,9864$$

(4.32)

$$TPE = -5 \cdot 10^{-6} x^6 + 0,0004x^5 - 0,009x^4 + 0,0949x^3 - 0,2792x^2 + 0,4151x + 30$$

$$R^2 = 0,9878$$

(4.33)

$$E = 0,0378x$$

$$R^2 = 0,9946$$

(4.34)

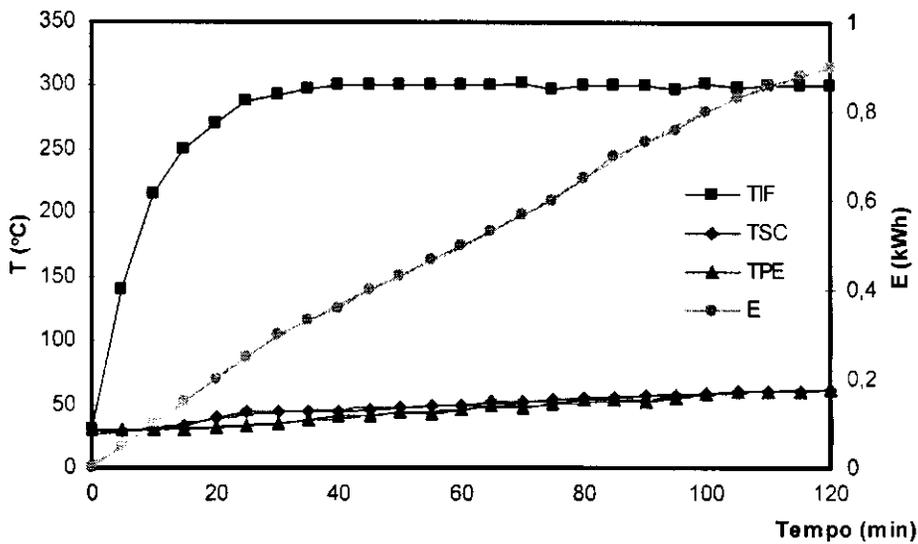


Figura 4.52 - Perfis de temperatura interna do forno (TIF), da saída da chaminé (TSC), parede externa (TPE) e Consumo de Energia (E).

A Tabela 4.8 representa o consumo de energia e hidrogênio para o perfil de TIF em análise.

Tabela 4.8 – Consumo de Hidrogênio e Energia

T(°C)	H ₂ O (L)	E (kWh)	V. Teórico	V.Pratico	Erro (%)
			H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)	
300	0,105	0,9	0,136	0,131	3,68

4.4 – Ilustrações do Sistema de Aquecimento.

A Figura 4.53 retrata, no quadro da esquerda o forno aberto, sendo simulada sua alimentação com pãezinhos de queijo, onde se observa no fundo do mesmo o ponto de alimentação com a chama do maçarico acesa. Este aspecto inicial da alimentação é o mesmo para as três aplicações em estudo. Ainda no quadro da esquerda, observa-se na parte inferior a temperatura registrada no sistema de aquisição de dados, utilizada para assar os pãezinhos, apresentados no quadro da direita.



Figura 4.53 – Foto ilustrativa do sistema para aplicação em padarias

A Figura 4.54 retrata o maçarico aceso, conectado no ponto de alimentação situado na parte traseira do forno.



Figura 4.54 – Ponto de alimentação do sistema

A Figura 4.55 ilustra, no canto inferior direito, o forno aberto com uma coloração rubra, característica do sistema quando está sendo aquecido para a aplicação em cerâmica vermelha, bem como para revestimento cerâmico. Observa-se no forno, três pontos distintos: um, o canto inferior direito do ponto de alimentação; dois, um orifício no canto inferior esquerdo que se conecta com a chaminé; três, um orifício menor no centro do forno em que está conectado o termopar. Observa-se ainda na figura a simulação da alimentação dos corpos de prova crus, e na outra ilustração as peças queimadas a 1150°C. No canto superior direito o equipamento coletor de dados registra a temperatura de 900°C do momento em que o forno foi aberto.

A Figura 4.56 retrata a coleta do vapor de água na saída da chaminé, resultante da combustão do hidrogênio, onde se observa a condensação dos vapores na parede interna do becker, sem visualizar os gases nocivos resultantes da combustão de combustíveis de origem orgânica. Nota-se, desta forma, apenas o aspecto molhado do becker característico da condensação do vapor de água.

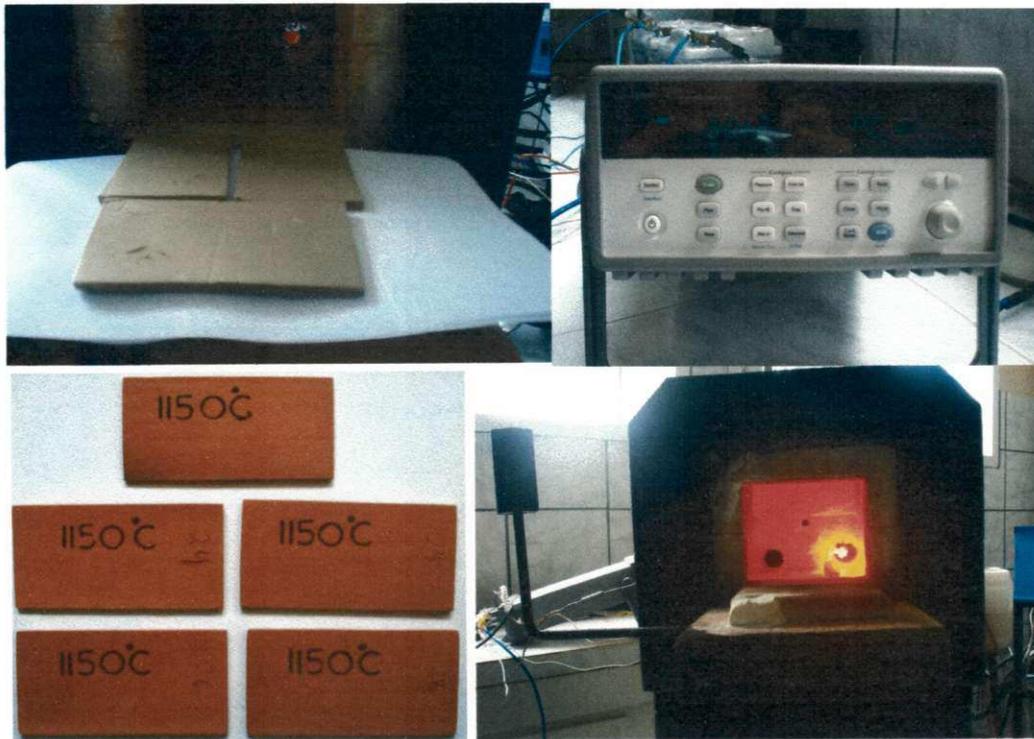


Figura 4.55 – Foto ilustrativa do sistema para aplicação na indústria cerâmica e de olarias

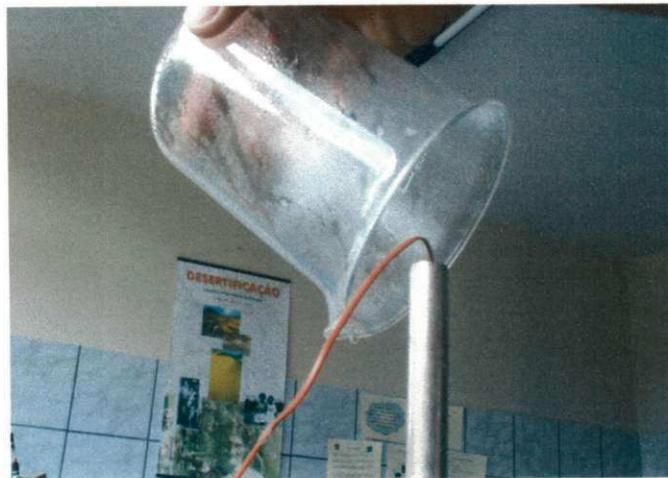


Figura 4.56 – Coleta do vapor de água na saída da chaminé

4.5 – Custo Estimado de Geração do Hidrogênio Utilizando Sistema Híbrido Formado por Painéis Solares Fotovoltaicos e Baterias, e outro Utilizando Energia Convencional

Neste item é feita uma estimativa do custo de produção de 1 Nm³/h de hidrogênio utilizando-se as seguintes fontes de energia: um sistema híbrido constituído de painéis solares fotovoltaicos e baterias, e outro utilizando energia elétrica convencional. O custo de produção do hidrogênio obtido a partir do sistema híbrido depende basicamente de dois fatores: número e custo dos módulos fotovoltaicos e da quantidade de baterias usado no sistema. Já o custo da produção via energia convencional depende basicamente do preço do kWh de energia e do valor do eletrolisador.

O custo estimado foi calculado para 25 anos, baseado na vida útil dos painéis fotovoltaicos e do eletrolisador. As Tabelas 4.9. 4.10 apresentam os respectivos custos.

- **Estimativa via painel solar fotovoltaico e bateria**

A máquina utilizada para produção do hidrogênio é um eletrolisador do tipo bipolar, com potência máxima de trabalho de aproximadamente 5.000 W, projetado pela equipe de pesquisadores em tecnologia do hidrogênio do LABDES. O custo do eletrolisador foi estimado com base em pesquisa de preço das peças constituintes do equipamento, no comércio de Campina Grande - PB, mais o custo do projeto e mão-de-obra para a montagem do eletrolisador. Foi medido que cada painel fotovoltaico gera potência média em torno de 84 W, e o custo de cada painel fornecido pelo comércio apresenta valor médio de R\$ 1.500,00.

Para este caso, são considerados os seguintes fatores: o tempo de vida do conjunto de baterias é de 5 anos, sendo efetuadas 5 trocas durante o período de vinte e cinco anos. O sistema é projetado para trabalhar

efetivamente 6 horas por dia produzindo hidrogênio com descarga máxima do conjunto de bateria correspondente a 30% de sua carga. O sistema seria projetado para ter capacidade de trabalhar às seis horas apenas com a carga do conjunto de baterias, durante a ausência total do sol, ou com a presença deste, onde a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos seria utilizada para geração do hidrogênio e recarga automática das baterias. O sistema assim projetado teria capacidade de fornecer os 5000 W através dos painéis fotovoltaicos, com insolação máxima do sol, ou fornecer essa mesma potência através do conjunto de baterias sendo que um sistema de controle poderia atuar de forma a minimizar o seu uso evitando assim seu maior desgaste. A potência 5.000 W necessária para alimentar o eletrolisador pode ser fornecida por 60 painéis e ou 16 baterias de (150 A/h x 12 V). Considerando-se que a cada 5 anos o jogo de baterias será substituído, em 25 anos o sistema consumirá no total 80 baterias. O valor médio de uma bateria nas características especificadas fica em torno de R\$ 400,00.

Tabela 4.9 – Custo de Produção do Sistema Híbrido

Sistema	R\$
Eletrolisador (1)	20.000,00
Painel Fotovoltaico (60unidades) (2)	90.000,00
Bateria (80 unidades, 150A/h e 12V) (3)	32.000,00
Instalação (10% de ((1) + (2) + (3)) (4)	14.200,00
Manutenção e Operação (2% ao ano) de ((1) + (2) + (3)) x 25 anos	71.000,00
Total	227.200,00

$$CESH = \frac{\text{R\$ } 227.200,00}{25 \text{ anos}} \times \frac{1 \text{ ano}}{300 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{6 \text{ h}} = \text{R\$ } 5,05/\text{h} \quad (4.36)$$

- Estimativa via energia convencional

Tabela 4.10 – Custo de Produção via Energia Convencional

Sistema	R\$
Eletrolisador (1)	20.000,00
Instalação (10% de (1)) (2)	2.000,000
Manutenção e Operação (2% ao ano) de (1) x 25 anos	8.000,00
Total	30.000,00

Para este caso considera-se que para a produção de 1 Nm³/h de hidrogênio são consumidos em média 5 kWh de energia. Considera-se que o sistema trabalha as mesmas 6 horas por dia, visando comparar com o caso anterior. Tendo como base o valor atual de 1 kWh de energia custando R\$ 0,30 centavos, tem-se o custo estimado de 1 Nm³/h no valor de:

$$CEC = \frac{\text{R\$ } 30.000,00}{25 \text{ anos}} \times \frac{1 \text{ ano}}{300 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{6 \text{ h}} + (5 \times \text{R\$ } 0,30) = \text{R\$ } 2,17/\text{h} \quad (4.37)$$

5.0 - CONCLUSÃO

O homem moderno do terceiro milênio está mergulhado em um mar de conscientização que aborda dois principais fatores: um, as atuais fontes de combustíveis fósseis estão por se exaurir; dois estes mesmos combustíveis estão transformando o ar dos grandes centros urbanos, tornando-os praticamente irrespiráveis e prejudicando de forma incisiva a saúde de sua população. Por outro lado, a comunidade científica que pesquisa a utilização de novos combustíveis vislumbra no hidrogênio uma alternativa viável, pelo fato de poder ser gerado a partir de fontes renováveis, e de possuir após sua combustão um caráter limpo e ecologicamente correto sem agredir o meio ambiente. Apenas estes fatores já justificam a pesquisa e o desenvolvimento de equipamentos que venham a utilizar o hidrogênio eletrolítico como combustível. O desenvolvimento de um sistema de aquecimento, forno, vem contemplar essa nova aplicação do hidrogênio, já que esta pesquisa é pioneira e não se tem notícia em nenhum outro lugar do mundo, além do LABDES que desponta para a possibilidade num futuro próximo apresentar um protótipo acabado do referido forno.

O desenvolvimento dos perfis de aquecimento para as três aplicações alvo deste projeto foi extremamente experimental e cheio de dificuldades, já que os mesmos foram concebidos através de tentativas, e em seguida testava-se se o produto obtido queimado naquele perfil ficava dentro das especificações técnicas recomendadas pela literatura. Esta metodologia foi o ponto de partida que culminou no conhecimento e domínio da construção dos perfis de aquecimento durante o intervalo de tempo previamente determinado, onde ao final era quantificado o volume consumido de hidrogênio.

Os dados obtidos de desenvolvimento dos perfis de temperatura em função do consumo de hidrogênio, bem como da qualidade do produto obtido, em menor intervalo de tempo para o caso dos produtos de olaria, respalda a possibilidade de se adaptar um forno comercial que originalmente utiliza gás natural ou GLP para fazer uso de hidrogênio como

combustível, onde se colocaria no sistema de controle o perfil de temperatura obtido neste trabalho e realizar-se-ia um estudo comparativo de consumo e custo de ambos os combustíveis.

Este sistema de aquecimento conjugado com painel solar e turbina eólica, gerando energia elétrica, e esta produzindo hidrogênio a partir da eletrólise da água, pode perfeitamente ser implantado na região do semi-árido nordestino nas indústrias de panificação, onde se substituiria os fornos a lenha por esta nova tecnologia, evitando assim o desmatamento de áreas nativas que provoca a desertificação de grande parte da região. O forno funcionando a hidrogênio é uma idéia nova, na qual foram dados os primeiros passos, e precisa, sem dúvida, da continuidade deste estudo juntamente com o envolvimento de instituições de pesquisa federais regionais e estaduais no desenvolvimento e aplicação desta tecnologia para benefício das populações das localidades em que o projeto possa vir a ser implantado.

- Análise de TSC (1050°C)

1. Na primeira versão; a configuração da chaminé canalizava o fluxo de calor no interior da serpentina, ocasionando elevada perda de calor pela saída da chaminé. Este fato é observado através da diferença entre as temperaturas finais de TIF e TSC, de apenas 350°C, denotando uma baixa eficiência durante o processo de aquecimento.
2. Na versão dois; a retirada da serpentina proporcionou uma considerável melhoria do rendimento térmico do sistema, observando que a diferença entre as temperaturas finais de TIF e TSC foi de 632°C, revelando que o sistema conseguiu reter mais calor no interior do forno.
3. Na versão três; a diminuição do diâmetro da chaminé diminuiu em mais de 100°C a temperatura na saída da chaminé, que se converteu em aumento no rendimento térmico do sistema, onde se observa que a diferença entre TIF e TSC foi de 740°C.

- Análise do consumo de E e H₂
 1. O ganho mais significativo na diminuição do consumo de energia e hidrogênio está relacionado com a modificação da primeira para a segunda versão do sistema, sendo observada a diminuição de 2,0 kWh no consumo de energia, para a temperatura de aquecimento de 1.050°C.
 2. A modificação da segunda para a terceira versão do sistema revelou uma diminuição, embora pequena, do consumo de energia e hidrogênio, tanto para a temperatura de aquecimento de 1.100°C quanto para 1.150°C.
 3. Levando-se em consideração que a maior perda de calor do sistema de aquecimento ocorre pela chaminé, esse parâmetro deve ser ainda melhor dimensionado, visando-se diminuir o máximo possível o consumo de energia e hidrogênio.

- Das três temperaturas estudadas, apenas as de 1.100 °C e 1.150 °C, revelaram que são apropriadas para a queima de argila empregada na produção de revestimentos cerâmicos, pois apresentaram valores de MRF Abs, dentro das especificações da norma da ABNT NBR 13818 (1997). Foi ainda realizada queima a 1.200 °C, porém as peças sofreram super queima, que denota não ser uma temperatura ideal para queima.

- Para a aplicação em fornos de olaria à temperatura ideal de queima de 900°C, foi analisada para os tempos de queima de 45 e 60 minutos; os resultados obtidos para o MRF foram respectivamente de 9,13 e 9,27 MPa acima do recomendado pela literatura. O tempo de queima, embora bastante inferior aos praticados pelas olarias, mostrou através dos resultados obtidos que é possível diminuir significativamente o tempo praticado pelas olarias, sem prejuízo da qualidade final do produto obtido. Este fato pode ser atribuído ao processo mais eficiente de combustão do hidrogênio e à característica limpa do combustível, que não produz, durante

a queima, substâncias químicas que poderia atacar as peças queimadas, e, como consequência, afetar a qualidade final do produto. Contribui ainda para a diminuição do tempo de queima, o poder calorífico do hidrogênio bem mais superior do que os combustíveis derivados do petróleo e a lenha.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

1. Converter um forno industrial que utiliza lenha e gás natural como combustível, para fazer uso do hidrogênio eletrolítico como combustível alternativo, possibilitando desenvolver uma correlação de consumo entre essas três fontes.
2. Desenvolver um sistema integrado de energias solar e eólica, e a partir dessas fontes alternativas produzirem hidrogênio eletrolítico.
3. Fazer uma estimativa do custo do hidrogênio eletrolítico obtido da fonte solar e eólica, bem como do sistema integrado das duas fontes.
4. Realizar um estudo mais criterioso do valor econômico final do hidrogênio, abordando aspectos como: impactos positivos para o meio ambiente, o custo e benefício do domínio de uma energia renovável e ecologicamente limpa e a aplicabilidade do projeto em áreas menos desfavorecidas do semi-árido nordestino, visando à melhoria do índice de desenvolvimento humano dessa região, etc.
5. Realizar estudos tecnológicos para analisar a qualidade final dos produtos de olarias, cerâmicas e padaria utilizando o hidrogênio como combustível e compará-los com os produtos obtidos de fornos convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13816 *Placas Cerâmicas para Revestimento – Terminologia*, Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13817 *Placas Cerâmicas para Revestimento – Classificação*, Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13818 *Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio*, Rio de Janeiro, 1997.
- AMORIM M. C. C., *Avaliação de um Sistema de Aquecimento fazendo uso de Hidrogênio Eletrolítico como Fonte de Energia* (Dissertação de Mestrado) DEQ/UFPB/ Campina Grande - PB, 1995.
- ANDRADE N. C., *Avaliação de uma Soldadora Oxi-Hidrogênica com Adição de Oxigênio* (Dissertação de Mestrado) DEQ/UFPB/Campina Grande- PB, 1993.
- BAK T., NOWOTNY J., REKAS M., SORRELL C. C., *Photo-Electrochemical Hydrogen from Water Using Solar Energy. Materials-Related Aspects*, International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 991 – 1022
- BEN 2003, *Balanco Energético Nacional Ano Base 2002*, disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em novembro de 2004.
- BOCKRIS J. O. M., *The Origin of Ideas on a Hydrogen Economy and its Solution to the Decay of the Environment*, International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 731 – 740.

- BOCKRIS J. O. M., e CONWAY B. E. *Modern Aspects of Electrochemistry*, Plenum Press – New York, 1975.
- CASPER M. S., *Hydrogen Manufacture by Electrolisis, Thermal Decompositional Unusual Techiniques*, Noyes Data Corporation, Park Ridje, New Jersey, USA., 1978.
- CENTRO CERÂMICO DO BRASIL (CCB) *Ensaio para Certificação de Revestimento Cerâmico Segundo Norma NBR 13818*, 1999.
- COX K. E. e WILLIAMSON Jr. K. D., *Hydrogen: It's Technology and Implications*, vol. 1 CRC Press, Clereland, 1977.
- DCA, *Insolação Global (Horas), Média Anual – Paraíba. Período 1974 – 1998*. Disponível em < <http://www.dca.ufcg.edu.br> > Acesso em 20 de julho de 2005.
- DUNN S., *Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System*, International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 235 – 264..
- GOLDFARB J., FRANÇA K., PALOMINO G. N., ALVES J. J. N., *Opção Alternativa para produção de Energia em Alta Escala no Nordeste*, IV Encontro Regional de Química, Aracajú, SE, novembro, 1989.
- GOLTSOV A. V., VEZIROGLU T. N., *From Hydrogen Economy to hydrogen Civilization* International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 909 – 915.
- HEFNER III R. A., *The Age of Energy Gases*, International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 1 – 9.
- LABORDE H. M., LAMY C. e LEGER J. M., *Etud Prospective Sur L'état de La Connaissance Dans Le Domaine Piles à Combustible Hydrogène*

Oxygène À Electrolyte Polymère Cationique, Contrat nº 896/CNES/93/0990. Abril 1995.

LIPMAN T. E., *What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future Sources of Hydrogen Energy*. Disponível em <<http://www.its.ucdavis.edu/publications/2004/>>. Acesso em 28 de outubro de 2004.

MACEDO S. R., *Estudo das Matérias Primas e Tijolos Cerâmicos Furados Produzidos no Estado da Paraíba*, (Dissertação de Mestrado) DEQ/UFPB/ Campina Grande – PB, 1997.

Memento de L'Hydrogène, disponível no site Association Française de L'Hydrogene < <http://www.afh2.org/> >. Acesso em outubro de 2003.

MOMIRLAN M. e VEZIROGLU T. N., *Current Status of Hydrogen Energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 (2002) 141 – 179.

MOURA J.C., *Manual de Segurança para o Hidrogênio*. CODETEC, UNICAMP, Campinas, SP, 1980.

PEREIRA F. F., *Desenvolvimento e Avaliação de um sistema de Aquecimento para Cozimento de Argilas Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível* (Dissertação de Mestrado) DEQ/UFCG/ Campina Grande - PB, 1999.

PEREIRA F. F., *Development and Evolution of a System of Heating for Cooking of Clay Using Hydrogen Eletrolitic as Fuel*, XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), Águas de São Pedro, SP – Brazil – 2000.

PERRY R. H., CHILTON C. H., *Manual de Engenharia Química*, quinta edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

PILLA L., *Físico Química, volume 2*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1980. V. 2 .

PLETCHER D., WALSH F. C., *Industrial Electrochemistry*, Paperback edition 1993.

SILVA E. P., CAMARGO J. C., *Integração e Sistemas com Células Combustível*, 1º WorkShop Internacional sobre Células a Combustível. São Paulo, SP – 2002.

SILVA E.P., *Introdução à tecnologia e Economia do Hidrogênio*, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 1991.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. Edgard Blücher, São Paulo 1992.

SUDÉRIO V. M., *Estudo do Processamento de Laminação de Placas Cerâmicas em Comparação com Outros Métodos Convencionais*, tese defendida no programa de Doutorado em Engenharia de Processos da UFCG, Campina Grande abril de 2005.

ANEXO

Tabelas dos dados experimentais obtidos em laboratório

Tabela 1 – Dados da Figura 4.1

Tempo	TIF	TSC	TPE
0	27	27	27
5	200	100	27
10	300	150	28
15	406	180	30
20	665	430	53
25	739	491	57
30	778	531	62
35	810	556	74
40	843	581	91
45	867	596	107
50	886	610	117
55	903	630	122
60	965	655	128
65	1000	669	130
70	1020	678	134
75	1035	685	142
80	1050	700	150

Tabela 3 – Dados da Figura 4.3

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	31	0,0
5	180	42	31	0,1
10	271	69	31	0,2
15	371	96	31	0,3
20	462	149	32	0,5
25	770	329	36	0,8
30	887	393	44	1,2
35	958	428	52	1,6
40	1000	456	59	2,0
45	1031	470	65	2,4
50	1050	485	71	2,8
55	1073	497	75	3,1
60	1100	500	80	3,4

Tabela 2 – Dados da Figura 4.2

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	29	0,0
5	160	31	29	0,1
10	210	46	29	0,2
15	270	61	30	0,3
20	366	77	30	0,4
25	481	99	31	0,5
30	780	269	36	0,8
35	885	336	45	1,2
40	961	375	52	1,6
45	1007	402	58	2,0
50	1027	410	63	2,4
55	1036	409	68	2,7
60	1050	418	74	3,0

Tabela 4 – Dados da Figura 4.4

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	30	30	30	0,0
5	235	59	30	0,1
10	332	89	30	0,2
15	420	110	31	0,3
20	745	321	35	0,7
25	845	378	41	1,1
30	961	390	48	1,5
35	1013	418	55	1,9
40	1053	438	62	2,3
45	1087	458	67	2,6
50	1111	471	72	3,0
55	1135	486	76	3,4
60	1150	511	80	3,8

Tabela 5 – Dados da Figura 4.5

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	29	31	30	0,0
5	250	31	30	0,1
10	315	36	31	0,2
15	430	55	31	0,3
20	720	170	39	0,6
25	848	229	48	0,9
30	932	260	54	1,3
35	989	281	61	1,7
40	1.037	300	68	2,1
45	1.075	315	77	2,5
50	1.104	335	81	2,9
55	1.130	345	85	3,2
60	1.150	360	89	3,5

Tabela 7 – Dados da Figura 4.7

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	30	30	30	0,0
5	268	33	30	0,1
10	310	47	31	0,2
15	447	64	31	0,3
20	730	174	37	0,6
25	874	239	48	1,0
30	955	271	55	1,4
35	1014	290	62	1,7
40	1060	314	69	2,1
45	1090	329	75	2,5
50	1110	338	80	2,9
55	1135	346	82	3,3
60	1150	354	88	3,6

Tabela 6 – Dados da Figura 4.6

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	31	0,0
5	239	32	31	0,1
10	331	55	31	0,2
15	450	70	31	0,3
20	735	180	40	0,6
25	880	240	49	1,0
30	1.000	262	54	1,4
35	1.030	280	60	1,8
40	1.058	293	70	2,2
45	1.085	310	79	2,6
50	1.105	320	82	3,0
55	1.130	335	85	3,3
60	1.150	350	90	3,6

Tabela 8 – Dados da Figura 4.8

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	30	30	30	0,0
5	270	33	30	0,1
10	315	47	31	0,2
15	450	65	31	0,3
20	733	177	38	0,6
25	900	240	47	1,0
30	958	275	55	1,4
35	1015	291	63	1,7
40	1060	315	70	2,1
45	1092	330	75	2,5
50	1113	340	81	2,9
55	1123	345	84	3,3
60	1150	350	87	3,6

Tabela 9 – Dados da Figura 4.9

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	30	30	0,0
5	180	30	30	0,1
10	270	36	32	0,2
15	334	52	34	0,3
20	466	70	36	0,4
25	722	190	40	0,7
30	823	240	44	1,0
35	910	275	50	1,4
40	968	290	56	1,7
45	1.010	315	60	2,1
50	1.047	320	70	2,5
55	1.075	335	74	2,9
60	1.106	345	80	3,2

Tabela 11 – Dados da Figura 4.11

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	30	0
5	193	31	30	0,1
10	275	33	30	0,2
15	350	48	31	0,3
20	478	68	33	0,5
25	795	190	41	0,8
30	870	226	50	1,1
35	944	261	57	1,5
40	990	284	63	1,8
45	1036	300	69	2,2
50	1052	313	75	2,5
55	1077	321	80	2,9
60	1100	330	83	3,2

Tabela 10 – Dados da Figura 4.10

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	30	30	30	0,0
5	189	30	30	0,1
10	266	36	30	0,2
15	356	51	30	0,3
20	482	68	32	0,4
25	751	196	40	0,8
30	870	246	50	1,1
35	940	281	57	1,5
40	993	304	64	1,9
45	1038	322	68	2,3
50	1053	324	75	2,7
55	1084	343	78	3,0
60	1102	347	80	3,3

Tabela 12 – Dados da Figura 4.12

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	30	0,0
5	200	31	30	0,1
10	280	33	30	0,2
15	350	49	31	0,3
20	485	70	33	0,5
25	780	195	40	0,8
30	885	230	51	1,1
35	945	263	56	1,5
40	1000	287	63	1,8
45	1040	301	70	2,2
50	1055	313	76	2,5
55	1080	325	80	2,9
60	1100	335	84	3,2

Tabela 13 – Dados da Figura 4.13

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	30	0,0
5	145	31	30	0,1
10	250	34	30	0,2
15	349	46	30	0,3
20	438	66	31	0,4
25	505	72	34	0,5
30	799	210	44	0,8
35	900	260	55	1,2
40	972	290	60	1,6
45	995	293	65	2,0
50	1005	297	70	2,4
55	1035	305	75	2,7
60	1050	310	80	3,0

Tabela 15 – Dados da Figura 4.15

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	30	30	0,0
5	143	30	30	0,1
10	250	34	30	0,2
15	349	46	31	0,3
20	435	65	32	0,4
25	505	70	36	0,5
30	799	207	46	0,9
35	906	256	55	1,3
40	974	289	61	1,7
45	986	290	67	2,1
50	1014	298	71	2,4
55	1040	310	77	2,7
60	1050	310	81	3,0

Tabela 14 – Dados da Figura 4.14

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	31	0,0
5	150	31	29	0,1
10	240	33	29	0,2
15	341	47	30	0,3
20	431	64	31	0,4
25	500	69	37	0,5
30	795	206	48	0,9
35	905	260	56	1,3
40	976	290	62	1,7
45	1000	295	66	2,1
50	1020	305	71	2,4
55	1034	310	75	2,7
60	1050	313	79	3,0

Tabela 16 – Dados da Figura 4.16

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	31	31	30	0,0
5	140	31	30	0,1
10	243	35	30	0,2
15	345	45	30	0,3
20	433	63	31	0,4
25	502	70	35	0,5
30	800	205	45	0,8
35	900	255	54	1,2
40	970	290	60	1,6
45	990	292	66	2,0
50	1000	297	70	2,4
55	1035	305	76	2,7
60	1050	309	80	3,0

Tabela 17 – Dados da Figura 4.17

Tempo	TIF	TSC	TPE
0	1.150	501	80
5	856	298	88
10	754	264	100
15	684	246	109
20	631	233	115
25	587	224	120
30	551	215	122
35	520	208	123
40	491	200	122
45	466	194	122
50	443	189	120
55	423	184	118
60	403	178	117
65	386	174	115
70	370	170	112
75	355	166	111
80	341	161	108
85	328	158	106
90	316	154	102
95	305	151	101
100	294	147	99
105	284	143	97
110	274	140	95
115	265	136	93
120	256	133	90

Tabela 18 – Dados da Figura 4.18

Tempo	TIF	TSC	TPE
0	1.151	356	90
5	907	193	105
10	807	152	116
15	737	132	125
20	683	121	131
25	639	114	135
30	601	110	138
35	569	106	138
40	542	103	138
45	516	100	139
50	493	98	135
55	472	96	136
60	453	94	132
65	434	92	131
70	418	91	128
75	402	89	125
80	389	88	123

Tabela 19 – Dados da Figura 4.33

Tempo	T=1150°C	1100°C	1050°C
	E(kWh)	E(kWh)	E(kWh)
0	0	0,0	0,0
5	0,1	0,1	0,1
10	0,2	0,2	0,2
15	0,3	0,3	0,3
20	0,6	0,4	0,4
25	1	0,7	0,5
30	1,4	1,0	0,8
35	1,7	1,4	1,2
40	2,1	1,7	1,6
45	2,5	2,1	2,0
50	2,9	2,5	2,4
55	3,3	2,9	2,7
60	3,6	3,2	3,0

Tabela 20 – Dados da Figura 4.34

Tempo	T=1150°C	T=1100°C	T=1050°C
	H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)	H ₂ (m ³)
0	0,000	0,000	0,000
5	0,016	0,016	0,016
10	0,031	0,031	0,031
15	0,047	0,047	0,047
20	0,093	0,062	0,063
25	0,156	0,109	0,079
30	0,218	0,156	0,126
35	0,264	0,218	0,189
40	0,327	0,264	0,252
45	0,389	0,327	0,315
50	0,451	0,389	0,378
55	0,513	0,451	0,426
60	0,560	0,498	0,473

Tabela 21 – Dados da Figura 4.42

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	25	25	25	0,0
5	137	25	25	0,1
10	194	27	25	0,2
15	255	34	26	0,3
20	307	44	28	0,4
25	362	57	30	0,5
30	486	89	34	0,8
35	755	186	43	1,1
40	866	233	52	1,4
45	900	243	58	1,7

Tabela 22 – Dados da Figura 4.43

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	27	27	27	0,0
5	121	27	27	0,1
10	171	28	27	0,2
15	201	31	27	0,3
20	244	35	28	0,4
25	293	42	30	0,5
30	347	48	33	0,6
35	426	65	36	0,7
40	500	72	41	0,9
45	757	181	49	1,2
50	868	229	56	1,5
55	900	233	61	1,8
60	900	230	65	2,1

Tabela 23 – Dados da Figura 4.48

Tempo	E1	E2
	(45 minutos)	(60 minutos)
0	0	0
5	0,1	0,1
10	0,2	0,2
15	0,3	0,3
20	0,4	0,4
25	0,5	0,5
30	0,8	0,6
35	1,1	0,7
40	1,4	0,9
45	1,7	1,2
50		1,5
55		1,8
60		2,1

Tabela 24 – Dados da Figura 4.49

Tempo	H1	H2
	(45 minutos)	(60 minutos)
0	0,000	0,000
5	0,015	0,015
10	0,031	0,030
15	0,046	0,044
20	0,061	0,059
25	0,077	0,074
30	0,123	0,089
35	0,169	0,104
40	0,215	0,133
45	0,261	0,178
50		0,222
55		0,267
60		0,311

Tabela 25 – Dados da Figura 4.52

Tempo	TIF	TSC	TPE	E
0	30	28	30	0,000
5	140	28	31	0,050
10	214	30	31	0,100
15	249	34	31	0,150
20	271	40	32	0,200
25	288	45	33	0,250
30	292	45	35	0,300
35	298	44	38	0,330
40	300	45	41	0,360
45	300	46	42	0,400
50	300	47	44	0,430
55	300	49	43	0,470
60	300	50	46	0,500
65	300	52	50	0,530
70	302	53	47	0,570
75	298	54	51	0,600
80	300	55	54	0,650
85	300	56	54	0,700
90	300	57	52	0,730
95	298	58	55	0,760
100	302	59	59	0,800
105	299	60	60	0,830
110	300	61	61	0,860
115	300	61	61	0,880
120	300	62	62	0,900