



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROTÓTIPO DE UMA UNIDADE COM TRI-GERAÇÃO DE ENERGIA PARA  
UTILIZAÇÕES REMOTAS: APLICAÇÃO DE MÓDULO SEMICONDUTIVO  
GERADOR TERMOELÉTRICO**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
Como parte dos requisitos para obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ILDEFONSO MARTINS DOS SANTOS**

**Natal, junho de 2007.**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROTÓTIPO DE UMA UNIDADE COM TRI-GERAÇÃO DE ENERGIA PARA UTILIZAÇÕES  
REMOTAS: APLICAÇÃO DE MÓDULO SEMICONDUTIVO GERADOR TERMOELÉTRICO**

**ILDEFONSO MARTINS DOS SANTOS**

**Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**sendo aprovada em sua forma final.**

**Prof. Dr. Francisco Assis de Oliveira Fontes**  
**Orientador**

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Francisco Assis de Oliveira Fontes**  
**Presidente da banca examinadora**

**Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar**  
**(Co-orientador)**

**Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo**  
**Membro da banca examinadora**

**Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa**  
**Membro da banca examinadora**

Esta dissertação é dedicada:

Aos meus pais, Ildefonso dos Santos e Lúdia Martins dos Santos pelo apoio e incentivo em todas as minhas decisões.

A minha esposa Sônia Maria dos Santos e aos meus filhos

Abel Leandro Martins dos Santos e Aíse Aiara Martins dos Santos pela compreensão, incentivo, apoio necessário e, sobretudo pela compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, primeiramente, pela vida e saúde, e força para chegar até aqui.*

*Ao Prof. Francisco Assis de Oliveira Fontes, pelo apoio, incentivo e disponibilidade incondicional para orientação, fundamental na realização deste trabalho.*

*Ao Prof. Andrés Ortiz pelo apoio na parte eletrônica do trabalho.*

*Ao Prof. Cleiton Formiga pelas valiosas contribuições na organização do trabalho.*

*As instituições patrocinadoras: UFRN-PPGEM pela oportunidade para realizar este trabalho; CEFET-BA; SENAI-CETIND pelo apoio oferecido.*

*Ao amigo Milton Bastos pelas discussões valiosas e apoio constante.*

*Aos companheiros Edisio Muniz e Talita Batista pelas contribuições.*

*Ao Centro de Tecnologias do Gás, pelo empréstimo de equipamento, de grande valia na avaliação deste estudo.*

*Ao técnico Arivaldo Alves Délio (Vavá), Nicholau, Gonzaga e a equipe de bolsistas do CT da UFRN pelo grande apoio nas etapas de fabricação, montagem, e testes.*

## SUMARIO

	<b>CAPÍTULO 1</b> .....	14
1.1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.2	Objetivos .....	15
1.2.1	Geral .....	15
1.2.2	Específicos .....	15
	<b>CAPÍTULO 2</b> .....	16
2.1	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.2	Histórico dos geradores termoelétricos .....	16
2.3	Geradores termoelétricos no século XX .....	17
2.4	Geradores termoelétricos atuais .....	18
2.5	Aplicações de termogeradores em áreas remotas .....	19
2.6	Fonte de alimentação para áreas remotas (norte da Suécia) .....	19
2.7	Alimentação de estação repetidora situada em área remota .....	20
2.8	Sistema remoto de automação e compressão .....	21
	<b>CAPÍTULO 3</b> .....	23
3.1	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	23
3.1.1	1ª Lei da termodinâmica .....	23
3.1.2	2ª Lei da termodinâmica .....	23
3.1.3	Calor .....	24
3.1.4	Medição e registro de temperatura .....	26
3.1.4.1	Medição de temperatura .....	26
3.1.4.2	Registro de temperatura .....	27
3.1.5	Medição de vazão .....	28
3.1.6	Medição de voltagem e corrente .....	29
3.1.7	Medição de iluminância .....	29
3.1.7.1	Grandezas e conceitos de luminotécnica .....	29
3.1.7.2	Potência equivalente de iluminação útil .....	30
3.1.8	Geração termoelétrica .....	31
3.1.9	Módulo HZ-14 .....	33
3.1.10	Conversor cc-cc .....	35
3.1.10.1	Tipos de conversores .....	36
3.1.10.2	Conversor utilizado no protótipo .....	37
3.1.10.3	Circuito de controle .....	38
3.1.11	Cogeração .....	39
3.1.12	Balanço global de energia .....	40
3.1.12.1	Introdução .....	40
3.1.12.2	Eficiência energética .....	40
3.1.12.3	Rendimento térmico com cogeração .....	40
3.1.13	Balanço energético global do protótipo .....	41
3.1.13.1	Energia fornecida .....	41
3.1.13.2	Energia útil .....	41

	<b>CAPÍTULO 4</b>	42
4.1	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	42
4.1.1	Metodologia	42
4.2	Esquema da unidade GTE proposta	42
4.2.1	Descrição das partes da unidade GTE proposta	44
4.2.2	Fonte de calor	44
4.2.3	Fontes quente e fria	44
4.2.4	Sistema de refrigeração	46
4.2.5	Sistema de alimentação de gás	47
4.2.6	Sistema de iluminação	48
4.2.7	Módulo termoeletrico	48
4.2.8	Sistema de monitoração de temperaturas	49
4.2.9	Sistema de medição, aquisição e registro de temperatura	50
4.2.10	Conversor cc-cc	51
4.3	Descrição das instalações de ensaio	54
4.4	Procedimento de montagem	55
4.5	Isolamento térmico da unidade	56
4.6	Procedimento de ensaio	56
4.6.1	Ajustes preliminares	56
4.6.2	Vazão de água de resfriamento	56
4.6.3	Ajuste da pressão de gás	57
4.6.4	Pré-operação da unidade	57
4.6.5	Ensaio	58
4.7	Dados obtidos	60
4.7.1	Dados medidos	60
4.7.1.1	Volume de água de refrigeração versus o tempo de escoamento	60
4.7.1.2	Massa de gás versus o tempo de escoamento	60
4.7.1.3	Corrente versus voltagem gerada pelo módulo termoeletrico	60
4.7.1.4	Temperaturas da unidade	61
4.7.1.5	Iluminância	61
4.7.2	Dados calculados	61
4.7.2.1	Vazão de água de resfriamento	61
4.7.2.2	Vazão de gás	62
4.7.2.3	Potência fornecida pelo combustível	63
4.7.2.4	Potência do módulo termoeletrico	63
4.7.2.5	Potência dos trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração	64
4.7.2.6	Potência equivalente de iluminação útil	64
4.7.3	Processamento dos dados	65
	<b>CAPÍTULO 5</b>	66
5.1	<b>RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES</b>	66
5.2	Introdução	66
5.3	Resultados obtidos e análises	66
5.3.1	Vazão de gás e água de resfriamento	66
5.3.2	Temperaturas medidas	66
5.3.3	Intensidade luminosa e potência útil de iluminação	68
5.3.4	Comportamento do módulo termoeletrico	70
5.3.5	Comportamento da unidade de tri-geração	72

	<b>CAPÍTULO 6</b> .....	73
6.1	<b>CONCLUSÕES</b> .....	73
	<b>REFERÊNCIAS CITADAS</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS CONSULTADAS</b> .....	77
	Apêndice A – Aplicações de módulos termoeletricos .....	79
	Apêndice B – Controlador PWM CI TL494.....	83
	Apêndice C – Legislação a respeito de cogeração no Brasil .....	85
	Apêndice D – Trocador de calor do 1º estágio de cogeração .....	87
	Apêndice E – Trocador de calor do 2º estágio de cogeração.....	89
	Apêndice F – Detalhes do circuito conversor cc-cc .....	91
	Apêndice G – Dados pesquisados.....	93
	Apêndice H – Planilha de ensaio da unidade GTE.....	94



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito Seebeck .....	14
Figura 2: Geração termoelétrica (único par).....	31
Figura 3: Módulo termoelétrico HZ-14 que mostra o lado frio (direito). O lado quente (esquerdo) apresenta pontos do material da grelha de sustentação.....	33
Figura 4: Gráfico do comportamento previsto para as variáveis elétricas do módulo HZ-14...	34
Figura 5: Gráfico do comportamento previsto para a voltagem gerada em função da diferença de temperatura do módulo HZ-14.....	35
Figura 6: Circuito conversor <i>push pull</i> .....	37
Figura 7: Diagrama de blocos do conversor cc-cc com circuito de controle de $\delta$ .....	38
Figura 8: Esquema resumido da unidade GTE proposta .....	43
Figura 9: Vista inferior do cabeçote: fonte quente, rebaixo para adaptação do vidro do lampião e saída de gases quentes para o meio ambiente .....	45
Figura 10: Vista lateral do cabeçote: fontes fria e quente .....	45
Figura 11: Trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração.....	46
Figura 12: Sistema de refrigeração da unidade GTE.....	47
Figura 13: Alimentação de gás .....	47
Figura 14: Camisa de 500 velas <i>Aladdin</i> .....	48
Figura 15: Módulo termoelétrico HZ-14.....	48
Figura 16: Localização dos termopares na unidade GTE.....	49
Figura 17: Esquema de ligação do sistema de medição, aquisição e registro de temperatura ...	50
Figura 18: Vista frontal do <i>Field Logger</i> .....	50
Figura 19: Tela de monitoração do <i>Field chart</i> .....	51
Figura 20: Etapa de potência do conversor cc-cc <i>push pull</i> .....	52
Figura 21: Esquema do circuito controlador de $\delta$ proposto para o conversor cc-cc .....	52
Figura 22: Conversor cc-cc montado em placa de fibra de vidro.....	53
Figura 23: Aparato experimental .....	54
Figura 24: Aparato experimental (continuação).....	54
Figura 25: Módulo termoelétrico HZ -14, lado quente e lado frio.....	55
Figura 26: Aspecto da unidade GTE após isolamento térmico .....	56
Figura 27: <i>Becker</i> calibrado para medição da vazão de água de resfriamento.....	57
Figura 28: Alimentação de gás com cartucho de 190 g.....	58

Figura 29: Detalhes da alimentação de gás .....	59
Figura 30: Instrumentos para medição da vazão de gás .....	59
Figura 31: Gráfico dos transientes de temperaturas da unidade GTE .....	67
Figura 32: Função de distribuição de luminosidade.....	69
Figura 33: Potência equivalente de iluminação útil.....	69
Figura 34: Gráfico comparativo do comportamento do módulo nas condições ideais e de ensaio .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de medição de temperatura.....	49
Tabela 2 - Registro de vazões (condições de máxima potência).....	66
Tabela 3 - Pontos de temperatura da unidade .....	67
Tabela 4 - Iluminância (lx) em função da distância (m) do lampião da unidade GTE de tri- geração .....	68
Tabela 5 - Valores de corrente, tensão e potência para a carga associada .....	70
Tabela 6 - Desempenho do módulo termoelétrico .....	71
Tabela 7 - Desempenho do protótipo de unidade com tri-geração de energia.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CI	Circuito Integrado
COP	<i>Coeficient Of Performance</i> ( Coeficiente de Performance)
DNAE	Departamento Nacional de Águas e Energias
DSR	Demanda Suplementar de Reserva
EIA 232C	<i>Eletronic Industries Association</i> 232 (padrão da camada física: comunicação serial para microcomputador)
EIA 485	<i>Eletronic Industries Association</i> 485 (padrão da camada física: comunicação serial para dispositivos de aplicação industrial)
GPP	Gerador de Potência Piloto
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GTE	Gerador Termoelétrico
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MLP	Modulação de Largura de Pulso
MME	Ministério de Minas e Energia
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação de Largura de Pulso)
SED	Serviço Educacional do Distrito (Localizado no distrito <i>Grant County/Oregon-USA</i> )
TE	Elemento primário de temperatura

## RESUMO

A geração por termoeletricidade caracteriza-se como um processo sólido de conversão de energia térmica (calor) em elétrica sem a necessidade de partes móveis. Embora o processo de conversão seja de baixa eficiência o sistema apresenta alto grau de confiabilidade e baixíssimos requisitos de manutenção e durabilidade. Seu princípio é baseado nos estudos de termogeração realizados por Thomas Seebeck em 1821. O franco desenvolvimento das tecnologias de estado sólido para geração de termoeletricidade, a necessidade do melhor aproveitamento da energia, inclusive com incentivo a processos de cogeração, a redução do impacto ambiental aliados ao desenvolvimento de módulos semicondutores de alta eficiência, convergem para o uso da geração termoelétrica através de componentes de estado sólido em aplicações remotas. O trabalho apresenta o desenvolvimento, construção e avaliação de performance de um protótipo, em escala piloto, para tri-geração de energia visando aplicação em áreas remotas. A unidade é composta de um lampião a gás combustível como fonte primária de energia, um módulo semicondutor comercial para geração termoelétrica e uma camisa para produção da luminosidade. O projeto do dispositivo compatibilizou um cabeçote para adaptação no lampião, uma fonte quente para adaptação do módulo, um trocador de calor para ser utilizado como fonte fria e compor o 1º estágio de cogeração, um trocador de calor tubular para compor o 2º estágio de cogeração, a elaboração de um conversor cc-cc tipo *push pull*, adequação de um sistema de aquisição de temperatura. Realizou-se a montagem do protótipo em bancada para testes e ensaio na condição de carga plena a fim de avaliar a sua eficiência, sendo realizado balanço de energia da unidade. O protótipo apresentou uma eficiência elétrica de 0,73%, térmica de 56,55%, de iluminação de 1,35% e global de 58,62%. O protótipo desenvolvido, como também a metodologia de ensaio adotada atenderam aos objetivos propostos, possibilitando a obtenção de resultados conclusivos acerca do experimento. Otimização no sistema de fixação do módulo semicondutor, melhoramento na isolação térmica e design do protótipo e sistema de proteção ao usuário são sugestões para torná-lo um produto comercial.

**Palavras-chave:** Tri-geração. Aplicação remota. Cogeração. Eficiência. Conversor cc-cc.

Balanço de energia.

## ABSTRACT

The generation for termoelectricity is characterized as a solid process of conversion of thermal energy (heat) in electric without the necessity of mobile parts. Although the conversion process is of low efficiency the system presents high degree of trustworthiness and low requisite of maintenance and durability. Its principle is based on the studies of termogeneration carried through by Thomas Seebeck in 1800. The frank development of the technologies of solid state for termoelectricity generation, the necessity of the best exploitation of the energy, also with incentive the cogeneration processes, the reduction of the ambient impact allies to the development of modules semiconductors of high efficiency, converge to the use of the thermoelectric generation through components of solid state in remote applications. The work presents the development, construction and performance evaluation of an prototype, in pilot scale, for energy tri-generation aiming at application in remote areas. The unit is composed of a gas lamp as primary source of energy, a module commercial semiconductor for thermoelectric generation and a shirt for production of the luminosity. The project of the device made compatible a headstock for adaptation in the gas lamp, a hot source for adaptation of the module, an exchanger of to be used heat as cold source and to compose first stage of cogeneration, an exchanger of tubular heat to compose second stage of cogeneration, the elaboration of a converter dc-dc type push pull, adequacy of a system of acquisition of temperature. It was become fullfilled assembly of the prototype in group of benches for tests and assay in the full load condition in order to evaluate its efficiency, had been carried through energy balance of the unit. The prototype presented an electric efficiency of 0,73%, thermal of 56,55%, illumination of 1,35% and global of 58,62%. The developed prototype, as the adopted methodology of assay had also taken care of to the considered objectives, making possible the attainment of conclusive results concerning to the experiment. Optimization in the system of setting of the semiconductor module, improvement in the thermal insulation and design of the prototype and system of protection to the user are suggestions to become it a commercial product.

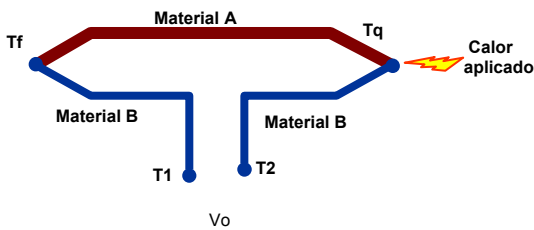
**Keywords:** Tri-generation. Remote application. Cogeneration. Efficiency. Dc-dc converter. Energy balanced.

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

Geradores termoelétricos convertem energia térmica (calor) diretamente em eletricidade sem a necessidade de peças móveis, utilizando a tensão gerada entre duas junções de metais diferentes. Thomas Johann Seebeck descobriu em 1821 que uma corrente elétrica flui em um circuito feito de dois metais diferentes, quando suas junções são expostas a diferentes temperaturas, conforme ilustrado na Figura 1. Denominado efeito Seebeck é o princípio básico dos termopares, método amplamente utilizado na medição de temperatura.

A tensão produzida é proporcional a diferença de temperatura entre as junções. A constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente de Seebeck. A Eq. 1 relaciona as grandezas associadas ao efeito Seebeck, (COSTA, 1982).



**Figura 1: Efeito Seebeck**  
**Fonte: SANTANILLA, 2004. (Adaptado)**

$$V_0 = \alpha_{xy}(T_q - T_f) \quad (1)$$

Onde:

$V_0$  é a tensão de Seebeck [V]

$\alpha_{xy}$  é o coeficiente diferencial de Seebeck, entre os materiais [V/ °C]

$T_q$  é a temperatura superior [°C]

$T_f$  é a temperatura inferior [°C]

As vantagens, abaixo relacionadas, contribuem para inserção da tecnologia de termogeradores em áreas remotas:

1. Conversão de calor residual diretamente em eletricidade;
2. Não possuem partes móveis, não geram ruídos, são confiáveis e dispensam manutenção, são bons para serem utilizados em locais remotos;
3. Podem ser usados com qualquer fonte de calor, são bastante flexíveis;
4. São leves e pequenos, portanto os módulos podem ser usados na produção de pequenos termogeradores.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Desenvolver um protótipo de geração termoelétrica de pequeno porte para aplicações remotas, funcionando a partir de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) em sistema de tri-geração: iluminação, geração elétrica cc e água quente.

### **1.2.2 Específicos**

1. Projetar e construir um protótipo adequando os trocadores de calor e o módulo termoelétrico aos requisitos do sistema;
2. Projetar um conversor de corrente-contínua para corrente-contínua (cc-cc) para elevar a tensão do Gerador Termoelétrico (GTE) para 12 V para carregar uma bateria;
3. Elaborar uma metodologia para teste e ensaio da unidade;
4. Ensaar e avaliar o desempenho do protótipo na condição de carga máxima.



## **CAPÍTULO 2**

### **2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nos próximos parágrafos será realizado o estudo da aplicação de termopilhas ou termogeradores, desde o século dezenove até os dias atuais.

Termopares associados em série são considerado uma termopilha por analogia com a pilha voltaica. A termopilha foi desenvolvida por Leopoldo Nobilli (1784-1835) e Macedônio Melloni (1798-1854). Ela foi usada inicialmente para medir temperatura e radiação infravermelha.

### **2.2 Histórico dos geradores termoelétricos**

Serão relatados em ordem cronológica alguns dos primeiros geradores termoelétricos ou “termopilhas” e suas características:

1864 – Termopilha de Markus – A força eletromotriz de um único par, conhecida como “um vigésimo da célula Daniel” que produzia em torno de 55 mV. Formada por um termopar no qual o metal negativo era uma liga de 10:6:6 de cobre, zinco e níquel e o metal positivo uma liga de 12:5:1 de antimônio, zinco e bismuto.

1864 – Termopilha de Becquerel – Inventada por Eduard Becquerel. A junção era composta de sulfeto de cobre para um metal e prata alemã para o outro.

1874 – Termopilha de Clamond – Utiliza uma liga de zinco-antimônio para um metal e ferro para o outro. Alimentada a gás combustível.

1879 – Termopilha de Clamond Melhorada – Apresentava força eletromotriz igual ou superior a 109 V, com uma resistência interna de 15,5  $\Omega$ . A máxima potência de saída era

192 W, em 54 V e 3,5 A.

18?? – Termopilha de Noe – Nesta pilha as junções quentes são direcionadas ao queimador central. As junções frias são refrigeradas por radiação e convecção através das aletas verticais externas.

A tensão de saída desta pilha era em torno de 2 V, com resistência interna de  $0,2 \Omega$ . Para uma pilha com 128 pares.

18?? – Termopilha de Hauck – Força eletromotriz de um simples par estimado como “0,1 de uma célula Daniel” que produzia em torno de 110 mV.

1898 – Termopilha de Gülcher – Tudo indica que era alimentada a gás, porque possuía uma torneira de gás colocada à direita, mas infelizmente é tudo que se sabe sobre este tipo de pilha até então.

### **2.3 Geradores termoeletrônicos no século XX**

1905 – Patente de Yamamoto – Kinzo Yamamoto patenteou no Japão, em 1925 uma pilha, na qual o material tipo P era feito de bismuto, antimônio e zinco nas seguintes proporções: Bi:Sb:Zi=12.0:48.0:36.8. As informações sobre esta pilha foram destruídas no terremoto de 1923.

1925 – Thermattaix – Possui um voltímetro com escala de 0-10 V que indicava a voltagem adequada para carregar um acumulador de 6,3 V. Tudo indica que o dispositivo foi projetado para carregar uma bateria tipo chumbo-ácido ao invés de alimentar um aparelho de rádio diretamente.

1930 – Gerador Termoelétrico Alimentado a Gás – Formado por uma variedade de termopares associados que produzia 2 V a 0,5 A para aquecer os filamentos das válvulas e 120 V a 10 mA para o circuito de alta tensão.

Termopares normalmente não produzem altas tensões, mas são simples junções entre dois tipos de fios, que permite a conexão de muitos termopares em série com este objetivo. Uma das mais úteis combinações é Ni/NiCr. i.e. níquel/níquel-cromo. Ele possui uma termovoltagem em torno de 4 mV/100K e faixa de temperatura de até 1000K. Isto é comparável ao par utilizado neste gerador; implica que 40 mV é em torno do máximo que se pode obter em cada termopar, então, são necessários 50 pares em série para produzir 2 V para suprir os filamentos das válvulas e 3000 termopares em série para produzir 120 V de alta tensão.

1950 – Gerador Termoelétrico Russo Feito com Lâmpada a Querosene – Foi projetado nos anos 50 mais uma vez com o objetivo de fornecer alimentação para aparelhos de rádio. As voltagens de saída são desconhecidas, mas de alguma forma a alta tensão era produzida, provavelmente por uma fonte de alimentação tipo vibrador. O vibrador é um dispositivo eletromecânico, semelhante a um sino elétrico, que “fatia a baixa voltagem” em corrente contínua (cc) transformando-a em corrente alternada (ca) que pode ser aplicada a um transformador elevador. Esta pilha era amplamente utilizada em rádios de automóveis antes da descoberta dos dispositivos semicondutores, (*THERMO-ELECTRIC GENERATORS*, 2006).

## 2.4 Geradores termoelétricos atuais

Estes dispositivos continuam sendo aplicados nos dias atuais, sendo usados em locais remotos onde pequenas quantidades de energia elétrica são necessárias e os problemas de motores a combustão interna e alternadores não são bem vindos. As versões modernas de termogeradores utilizam termopilhas fabricadas de uma variedade de elementos semicondutores a base de telureto de bismuto, e são mais que simples termopares. Estas termojunções são muito mais eficientes que simples termopares e vem sendo avaliadas desde a metade dos anos 60, (SANTANILLA, 2004).

A geração termoelétrica é bastante atrativa quando comparada às outras tecnologias de produção de pequenas quantidades de energia elétrica, principalmente quando aplicados em áreas remotas. Os sistemas a motor-gerador apresentam características como ruído excessivo, alto custo de combustível, custo alto de manutenção, e não são compatíveis com as exigências ambientais de produção mais limpa. Por outro lado os sistemas fotovoltaicos, bastantes utilizados em aplicações remotas, costumam apresentar falhas quando aplicados em regiões de vento forte e baixas temperaturas. Por estas razões a tecnologia termoelétrica vem ganhando cada vez mais terreno em aplicações onde se requer confiabilidade alta e baixo custo de manutenção.

## **2.5 Aplicações de termogeradores em áreas remotas**

As aplicações de termogeradores em áreas remotas são bastante diversificadas, indo das aplicações espaciais até as domésticas. A seguir serão elencadas algumas aplicações para que se tenha uma idéia do potencial desta tecnologia.

## **2.6 Fonte de alimentação para áreas remotas (norte da Suécia)**

No norte da Suécia centenas de famílias rurais vivem sem os benefícios propiciados pela eletricidade. Residentes em regiões montanhosas de difícil acesso e custo de interligação a rede de distribuição elétrica variando de \$5,000 a \$120,000 por residência.

Utilizam motor-gerador a gasolina para geração de eletricidade, lampião a querosene para iluminação e fogão de lenha para aquecimento. Os moradores no entanto não estavam satisfeitos com os geradores, pelo seu alto nível de ruído, alto custo de manutenção e de combustível. Um outro problema com os motores-geradores disponíveis é que suas características de saída não são compatíveis com os requisitos de carga para as residências.

Sua saída é normalmente maior que a demanda necessária. Se os geradores são utilizados para carregar baterias eles funcionam apenas por alguns períodos de tempo.

Anders Killander engenheiro do grupo de projetos do Instituto Royal de Tecnologia Sueco encarregou-se do problema de fornecer centenas de watt-hora por dia de energia elétrica. A investigação foi iniciada buscando-se métodos para produção de pequenas quantidades de eletricidade com as fontes de energia disponíveis. O resultado da investigação conduziu ao uso da tecnologia termoelétrica como meio de conversão e o fogão de lenha como a fonte de calor.

O projeto do gerador desenvolvido é uma unidade para ser colocada na parte superior do fogão de lenha. O projeto é baseado na utilização de dois módulos HZ-20 fabricados pela *Hi-z Technology, Inc.*

Os geradores que foram construídos e testados usam dois módulos HZ-20 ligados em série. A tensão nominal de saída de 4,76 V dos módulos é convertida para uma tensão nominal de 13,5V por um conversor cc-cc e é utilizada para carregar quatro baterias ácidas de 6 V ligadas em série-paralelo para obter 12 V. A fonte fria é refrigerada por um ventilador de 12 V cujo foi montado sobre a fonte fria para soprar ar frio. Foi selecionado um ventilador de 2,2 W.

Como benefício secundário o gerador reduziu a quantidade de combustível utilizada nas residências de forma geral. Porque o pequeno ventilador usado para refrigerar a fonte fria do gerador também promove a circulação de ar em torno do ambiente da cozinha. Resultando em uma mistura de ar com uma notável uniformidade de temperatura ambiente e maior nível de conforto, (KILLANDER, 1997).

## **2.7 Alimentação de estação repetidora situada em área remota**

O distrito de *Grant County* está localizado em uma área remota do estado do *Oregon* circundada de montanhas. O Serviço Educacional do Distrito (SED) é o responsável local para ajudar o estado a fornecer educação equitativa e um ambiente bem sucedido de aprendizagem aos estudantes. O *County* gerencia cinco escolas de ensino fundamental e médio. Para atingir a sua missão e cumprir os requisitos do estado para exame *online*, o SED investiu em tecnologia que o colocaria *online* na região.

O SED comprou uma linha T1 (linha de telefone dedicada que suporta dados a taxa de 1.544 Mbits/s), mas rapidamente percebeu que o alto custo para conectar cada escola separadamente era proibitivo. Então, instalou uma estação repetidora no topo de uma montanha para liberar um espectro de microondas e servir os *modems* para fornecer conectividade.

Inicialmente a estação foi alimentada com uma combinação de painel solar e bateria, cuja funcionou satisfatoriamente no verão, mas falhou nos meses de inverno quando a neve e os ventos fortes interrompiam o serviço.

A empresa *Global Thermoelectric* foi consultada para desenvolver um sistema remoto de alimentação que fosse confiável e de baixo custo de manutenção.

A *Global* forneceu ao *Grant County* um GTE de baixo custo de manutenção para suportar o painel solar e as baterias. O GTE foi apropriado para o topo da montanha porque não possui peças móveis e funciona bem em situações de frio extremo.

O distrito foi inicialmente surpreendido pelo sucesso do GTE e logo este se tornou a fonte primária de energia. Com a demanda para serviços pela *Internet* aumentando, o distrito comprou um segundo GTE para suportar o primeiro. A potência adicional deu estabilidade ao sistema e permitiu aplicar calor dentro da estação repetidora como proteção adicional aos equipamentos elétricos diminuindo os riscos de defeitos durante as temperaturas abaixo de zero, (*GLOBAL THERMOELETRIC*, 2006).

## **2.8 Sistema remoto de automação e compressão**

Em 1998 foi concluído um projeto de automação e compressão na localidade de *Bony Gathering* em *Idalia*, região do *Colorado*, *USA*, local conhecido pela incidência de ventos fortes, relâmpagos, apagões, nuvens pesadas e constantes tempestades de neve, que requer vários sistemas singulares de alimentação elétrica. O local mais crítico é o ponto de entrega *William*,

localizado a 26 milhas ( 41,86 km) a nordeste de *Idalia*. Se a alimentação para esta localidade for interrompida os efeitos podem ser catastróficos.

No local há totalizador de vazão, medição, monitoração e válvula de controle. Outros sistemas que também necessitam de alimentação elétrica são: analisador de umidade, bomba de vazão, temperatura do secador e pressão do gasoduto. Assim três sistemas de alimentação elétrica foram providenciados, a saber: o primeiro fornece alimentação a partir de um conversor de 120 Vca para 12 Vcc e uma bateria de 90 Ah. O segundo sistema é um painel solar de 60 W que atua em caso da queda da alimentação de 120 Vca. Por último um sistema Gerador de Potência Piloto (GPP). O GPP está localizado nos tubos de gases do sistema de aquecimento do secador e é interligado ao sistema de alimentação elétrico existente. O GPP fornece uma tensão de saída constante para alimentar o sistema indefinidamente, segundo Bass e Farley (1997).

A avaliação dos exemplos citados nos leva a crer que a aplicação de GTE's é bastante diversificada. No presente trabalho, será utilizado um lampião a gás como fonte de calor, equipamento há muito utilizado para iluminação de ambientes e que ao longo do tempo não sofreu aperfeiçoamento de modo a torná-lo mais eficiente. Sua aplicação junto com uma tecnologia de ponta, a geração termoelétrica com semicondutores, associada a cogeração, será a grande contribuição deste trabalho.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1.1 1ª Lei da termodinâmica

A Primeira lei da termodinâmica combina em uma única expressão a relação entre calor e trabalho. Ela diz que a energia interna de um sistema é relacionada ao trabalho realizado sobre o ambiente e ao calor transferido ao sistema, conforme Equação 2.

$$\Delta U = Q + W \quad (2)$$

Onde:

$\Delta U$  = representa as trocas de energia do sistema termodinâmico que caminha para um estado de equilíbrio como resultado de uma interação entre o sistema e suas vizinhanças;

$Q$  = é a quantidade de calor fornecida ou retirada do corpo;

$W$  = é a quantidade de trabalho realizado pelo sistema, neste caso recebendo sinal positivo, ou sobre o sistema, que para este caso recebe sinal negativo.

Assim, em se tratando de eficiência energética, a primeira lei da termodinâmica apresenta uma razão entre a energia que sai do processo e a energia que entra nele, onde a energia total é constante.

#### 3.1.2 2ª Lei da termodinâmica

A segunda lei, enunciada por Kelvin (1824-1907) – Planck (1858-1947) estabelece a assimetria entre trabalho e calor definindo que é impossível construir uma máquina, operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e convertê-lo integralmente em trabalho,



ou seja, nenhuma máquina converte calor em trabalho com eficiência total, alguma energia é sempre perdida por dissipação para uma região de menor temperatura, denominada como irreversibilidade, Equação 3.

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (3)$$

Onde:

$\eta_T$  = rendimento térmico total

$Q_L$  = calor de saída

$Q_H$  = calor de entrada

Este enunciado referente à máquina térmica diz que é impossível uma máquina térmica com rendimento de 100 %, pois pela definição de rendimento térmico o rendimento seria 100% se  $Q_L = 0$ , (apenas uma fonte de calor) ou se  $Q_H$  fosse infinito. Assim, uma máquina térmica tem que operar entre dois reservatórios térmicos - recebendo calor, rejeitando uma parte do calor e realizando trabalho.

Enunciado de Clausius (refere-se ao refrigerador) “É impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da passagem de calor da fonte fria para a fonte quente”

Este enunciado está relacionado ao refrigerador ou bomba de calor e estabelece ser impossível construir um refrigerador que opere sem receber energia (trabalho). Isto indica ser impossível um Coeficiente de Performance (COP) infinito, (ARAÚJO, 2005).

### 3.1.3 Calor

Calor é a forma de energia que se transmite entre corpos que possuem temperaturas diferentes. O corpo quente é denominado fonte e o corpo frio receptor. Normalmente a

transmissão de calor se dá da fonte para o receptor e são três os modos de transmissão: condução, convecção e radiação, muito embora nos processos de troca térmica sempre há combinação de dois ou três destes modos.

A condução é o modo de transferência de calor que geralmente ocorre entre materiais sólidos (metais, madeiras, cerâmicas etc) e é a propagação do calor por meio do contato de molécula de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes. Ocorre a propagação do calor sem transporte de massa do sistema, ou seja, através de choques entre suas partículas integrantes ou intercâmbios energéticos dos átomos, moléculas, elétrons.

A Equação 4 é utilizada para se obter fluxo de calor transferido por condução através de uma parede unidimensional.

$$Q = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (4)$$

Onde:

$Q$  = fluxo térmico condutivo [W]

$k$  = condutividade térmica do material [W/m.K]

$A$  = área de seção transversal material em [m<sup>2</sup>]

$L$  = comprimento do trajeto de calor em [m]

$(T_2 - T_1)$  = diferença de temperatura no trajeto de calor em [K]

A convecção é o processo de transporte de massa que pode ser também aplicado em transferência de calor. Esta forma de propagação de calor ocorre entre os fluidos. Pode ser classificada de acordo com a forma do escoamento em convecção forçada, convecção livre ou convecção combinada, dependendo da característica do movimento do meio que está em contato com a superfície. A Equação 5 é utilizada para se obter a quantidade do fluxo de calor transferido por convecção, independentemente da natureza particular do processo de convecção.

$$Q = hA(T_{\text{sup}} - T_f) \quad (5)$$

Onde:

$Q$  = fluxo de calor por convecção [W]

$A$  = área de troca de calor [ $m^2$ ]

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2 K$ ]

$(T_{sup} - T_f)$  = diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido [K]

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que estiver em uma temperatura finita. A energia do campo de radiação é transportada pelas ondas eletromagnéticas. A transferência de calor não necessita de qualquer meio material para se propagar sendo mais eficiente no vácuo. A Equação 6 é utilizada para se obter a quantidade de fluxo de calor transferido por radiação de acordo com Incropera e Witt (2003).

$$Q = \varepsilon \sigma A T_{sup}^4 \quad (6)$$

Onde:

$Q$  = fluxo térmico irradiado [W]

$\varepsilon$  = emissividade, propriedade radiativa da superfície,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann, ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$ )

$A$  = área da superfície emitente [ $m^2$ ]

$T_{sup}$  = temperatura termodinâmica da superfície emitente [K]

### 3.1.4 Medição e registro de temperatura

#### 3.1.4.1 Medição de temperatura

Temperatura é, do ponto de vista microscópico, a media da energia cinética associada aos movimentos aleatórios de partículas que compõe um dado sistema físico. No trabalho será realizada a medida de temperatura em vários pontos do protótipo para determinação dos fluxos térmicos do protótipo.

A técnica escolhida foi a medição com termopar, conforme já exposto tem seu princípio de funcionamento baseado no efeito Seebeck. O sensor escolhido o do tipo “T”, cujas características são:

Termopar tipo T (Cobre – Constantan)

Termoelemento positivo (TP): Cu 100%

Termoelemento negativo (TN): Cu 45%:Ni 55%

Faixa de utilização: -270 °C a 400 °C

f.e.m. produzida: -6,258 mV a 20,872 mV

O termopar tipo “T” pode ser utilizado em atmosferas inertes, oxidantes ou redutoras. Devido a grande homogeneidade com que o cobre pode ser processado, possui uma boa precisão. Em temperatura acima de 300 °C, a oxidação do cobre torna-se muito intensa, reduzindo sua vida útil e provocando desvio em sua curva de resposta, (BEGA, 2006).

#### **3.1.4.2 Registro de temperatura**

O registro de temperatura foi realizado com o auxílio do registrador eletrônico, *Field Logger*<sup>®</sup> e do software *Field Chart*<sup>®</sup>, (NOVUS, 2003).

O *Field Logger*<sup>®</sup> é um equipamento de aquisição e registro de variáveis analógicas. Opera como um registrador eletrônico de dados, armazenando as informações adquiridas em sua memória interna para análise posterior. Pode ainda operar como um módulo remoto de medição em tempo real, que não possui memória interna, e apenas adquire as informações e as transmite para um sistema de indicação e registro.

Seus oito canais de entrada configuráveis: entrada digital, saídas de alarme, alimentação de emergência, entre outros, fazem deste produto um instrumento muito versátil, o que possibilita sua utilização em inúmeras aplicações.

Sua configuração é feita através de *software* - Configurador *Field Logger*® V1.34 (*free ware*) que funciona sobre as plataformas *Windows95*® e superiores.

O *Field Chart*® é um software utilizado para indicação e registro das variáveis que estão na memória do *Field Logger*®. Permite a importação dos dados para planilha *Excel* para posterior manipulação. Foi desenvolvido pela empresa Novus Produtos Eletrônicos Ltda. A versão 1.59 foi utilizada no trabalho.

O *Field Logger*® e o *Field Chart*® foram configurados para realizar a aquisição e o registro das temperaturas do protótipo.

### 3.1.5 Medição de vazão

Vazão é a grandeza que expressa o volume ou massa de um fluido que escoar na unidade de tempo, as Equações 7 e 8 podem ser usadas para a sua determinação. No trabalho foi realizada a medida da vazão de gás e água de resfriamento. A vazão de gás para determinação do consumo do protótipo, da energia de entrada e da eficiência do sistema. A vazão de água, para o cálculo da eficiência do sistema de cogeração, (DELMEE, 2003).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (7)$$

Onde:

Q = vazão volumétrica [m<sup>3</sup>/h]

V = volume do fluido [m<sup>3</sup>]

t = tempo de escoamento [h]

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (8)$$

$\dot{m}$  = vazão em massa [kg/h]

m = massa do fluido [kg]

t = tempo de escoamento [h]

Existem várias técnicas para se determinar a vazão. No trabalho optou-se por utilizar a medição da massa de gás com uma balança digital e o tempo de escoamento desta com um cronômetro digital. A vazão de água foi medida utilizando-se um *becker* calibrado para obtenção do volume e o tempo de escoamento deste com um cronômetro digital.

### **3.1.6 Medição de voltagem e corrente**

A voltagem e a corrente são as grandezas elétricas utilizadas no cálculo da potência fornecida pelo módulo termoeletrico. Por conseguinte seus valores foram medidos com um multímetro digital de precisão, marca Minipa modelo ET 2500. Um multímetro foi instalado em série com a carga de  $0,198\ \Omega$ , para medir a corrente do módulo. O outro foi instalado em paralelo com o módulo para medir a voltagem gerada.

### **3.1.7 Medição da iluminância**

Luz é a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual. A aparência de um objeto é o resultado da iluminação incidente sobre o mesmo.

#### **3.1.7.1 Grandezas e conceitos de luminotécnica**

Fluxo Luminoso:  $\Phi$

É a quantidade total de luz emitida por uma fonte, medida em lúmen [lm].

Intensidade Luminosa: I

Expressa em candela [cd], é intensidade do fluxo luminoso projetado em uma determinada direção.

Iluminância: E

Expressa em lux [lx], é o fluxo luminoso que incide sobre uma superfície situada a uma certa distância da fonte. Ela é a relação entre a intensidade luminosa e o quadrado da distância.

Luxímetro:

Aparelho utilizado para medir a iluminância. Opera no intervalo de comprimento de onda visível, compreendido entre 380 e 780 nm.

No trabalho a iluminância foi medida utilizando-se um luxímetro de marca Lutron, modelo Light meter 102. As medições foram realizadas no plano horizontal no raio do círculo que passa pelo centro da lâmpada, espaçado a cada 0,20 m de distância da fonte no intervalo de 0 a 3 m, fazendo uma varredura vertical simétrica em cada ponto na faixa de -0,50 a +0,50 m em relação ao plano horizontal considerado.

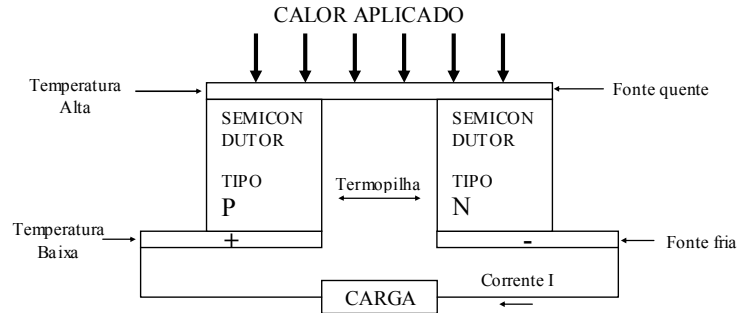
### **3.1.7.2 Potência equivalente de iluminação útil**

A potência equivalente de iluminação útil ( $P_i$ ) é a potência elétrica necessária para produzir a mesma irradiação no espectro visível da lâmpada a gás. A irradiação emitida fora do espectro visível será considerada perda de energia.

A metodologia proposta para estimar a potência equivalente de iluminação útil a partir da medição da iluminância com um luxímetro, baseia-se no conceito de potência específica, na eficiência luminosa média de lâmpadas das instalações do Brasil 32,31 lm/W, segundo Assaf e Pereira (2003), e na superfície iluminada, determinada através das curvas de isoluminescência no entorno da lâmpada ou superfícies cilíndricas obtidas com a distribuição de iluminação vertical traçadas para o ambiente iluminado. Esta função de distribuição pode ser determinada com os valores experimentais levantados, em função das distâncias (horizontal e vertical) de afastamento da lâmpada. Desta forma, pode-se delimitar uma faixa útil de melhor eficiência de iluminação e fechar o balanço para a superfície que apresenta o melhor resultado dentro da faixa.

### 3.1.8 Geração termoeétrica

Um gerador termoeétrico é formado por três partes essenciais: uma fonte quente, uma fonte fria e uma termopilha, conforme ilustra o esquema simplificado na Figura 2.



**Figura 2: Geração termoeétrica (único par)**  
**Fonte: COSTA, 1982. (Adaptado)**

As fontes quente e fria fornecem a energia para o sistema por meio da criação de um gradiente de temperatura através da termopilha. A termopilha converte a energia térmica em eletricidade. Como pode ser percebida a vantagem dos módulos termoeétricos reside na sua simplicidade de funcionamento.

A seguir serão mostradas as relações matemáticas fundamentais, entre as grandezas térmica e elétrica, envolvidas no processo de conversão, conforme Ono e Suzuki (1998).

A força eletromotriz de circuito aberto produzida por uma simples junção P-N pode ser obtida com a Equação 9.

$$E = \Delta\alpha.\Delta\theta \quad (9)$$

Com:

$$\Delta\alpha = \alpha_{(p)} - \alpha_{(n)} \quad \text{e} \quad \Delta\theta = \theta_q - \theta_f$$

Onde:

E = força eletromotriz de circuito aberto [V]



(p) = condutor tipo P

(n) = condutor tipo N

$\alpha_{(p)}$  = coeficiente absoluto de Seebeck do condutor tipo P [V/K]

$\alpha_{(n)}$  = coeficiente absoluto de Seebeck do condutor tipo N [V/K]

$\theta_q$  = temperatura da junção quente [K]

$\theta_f$  = temperatura da junção fria [K]

Figura de mérito ou fator Z. É a medida do desempenho global do dispositivo ou material termoelétrico. O material que possui figura de mérito alta, também possui alto desempenho termoelétrico. Um bom material termoelétrico deve possuir um Z alto, alto coeficiente de Seebeck, e baixas condutividade térmica e resistividade. Exemplos de materiais com tais características são as ligas à base de telureto de bismuto, amplamente utilizadas na fabricação de módulos termoelétricos. A Equação 10 é utilizada para obtenção da figura de mérito.

$$Z = \frac{(\alpha_{(p)} - \alpha_{(n)})^2}{(\sqrt{\rho_{(p)} \cdot \kappa_{(p)}} + \sqrt{\rho_{(n)} \cdot \kappa_{(n)}})} \quad (10)$$

Onde:

Z = figura de mérito ou fator Z [K<sup>-1</sup>]

$\alpha_{(p)}$  = coeficiente absoluto de Seebeck do condutor tipo P [V/K]

$\alpha_{(n)}$  = coeficiente absoluto de Seebeck do condutor tipo N [V/K]

$\rho$  = resistividade [Ω.m]

$\kappa$  = condutividade térmica [W/m.K]

A voltagem de circuito aberto de junções P-N interligadas em série é obtida da Equação 11.

$$V = \Delta\alpha \cdot (\theta_{q,1} - \theta_{f,1}) + \Delta\alpha \cdot (\theta_{q,2} - \theta_{f,2}) + \dots + \Delta\alpha \cdot (\theta_{q,n} - \theta_{f,n}) = \Delta\alpha \cdot \sum_1^n \Delta\theta_i \quad (11)$$

A máxima potência de saída é obtida com a Equação 12.

$$P_{m\acute{a}x} = \Gamma.(s / L).\Delta\theta^2 \quad (12)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$  = potência máxima de saída [W]

$\Gamma$  = potência específica da junção termoeétrica [W/m]

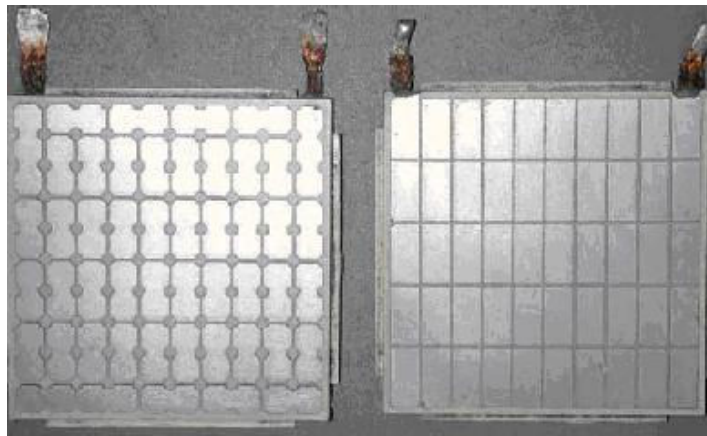
$s$  = área da junção de interface [m<sup>2</sup>]

$L$  = distância entre as junções quente e fria [m]

$\Delta\theta$  = diferença de temperatura entre as junções quente e fria [K]

### 3.1.9 Módulo HZ-14

O módulo termoeétrico HZ-14 utilizado no protótipo, foi fabricado pela empresa *Hi-Z Technology, Inc.* Proporciona o aproveitamento do calor residual convertendo-o em energia elétrica, com tensão máxima em vazio de 3,5 Vcc. A base de semicondutores com elevada eficiência relativa como PbSnTe e BiTe/SbTe, consiste de 98 pares como mostrado na Figura 3.

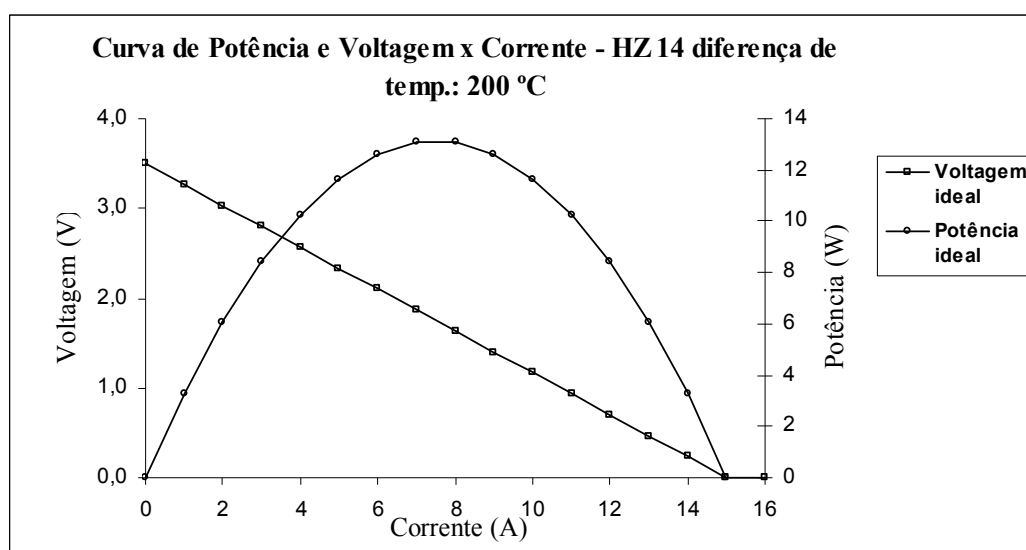


**Figura 3: Módulo termoeétrico HZ-14 que mostra o lado frio (direito). O lado quente (esquerdo) apresenta pontos do material da grelha de sustentação**  
**Fonte: LEAVITT, 2003.**

Quando instalado requer um fluxo de calor de aproximadamente 8 W/cm<sup>2</sup>. Com uma diferença de temperatura de 200°C converte 5% da energia térmica que passa por ele em eletricidade, gerando

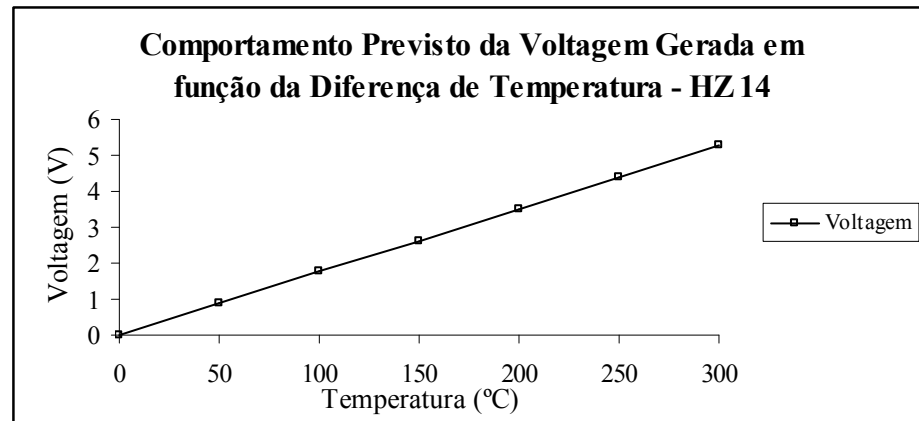
uma potência máxima de 14 W. Sua vida útil é estimada em 10.000 horas, quando instalado corretamente, (LEAVITT, 2003).

Este módulo requer alguns cuidados na sua aplicação, tanto para atingirem-se níveis de rendimento esperado, conforme apresentado na Figura 4, como também para garantir a integridade sob condições de funcionamento.



**Figura 4: Gráfico do comportamento previsto para as variáveis elétricas do módulo HZ-14**  
**Fonte: LEAVITT, 2003. (Adaptado)**

Portanto, a montagem do HZ-14 deve estar de acordo com especificações de quantidade e uniformidade de carga de compressão, dispositivo de fixação que absorva as suas dilatações térmicas nas mais variadas faixas de diferença de temperatura, distribuição uniforme da carga, temperaturas controladas e homogêneas, etc, onde a voltagem gerada varia em função da diferença de temperatura de acordo com a Figura 5.



**Figura 5:** Gráfico do comportamento previsto para a tensão gerada em função da diferença de temperatura do módulo HZ-14  
**Fonte:** LEAVITT, 2003. (Adaptado)

O módulo HZ-14 é muito utilizado em geradores termoelétricos. No apêndice A, são mostradas algumas aplicações do estado da arte em geração termoelétrica, inclusive com a utilização deste.

### 3.1.10 Conversor cc-cc

Um conversor cc-cc é um dispositivo eletrônico utilizado sempre que se deseja mudar eficientemente o nível da tensão cc de um valor para outro. São necessários, porque diferentemente da tensão ca, não se pode simplesmente usar um transformador para fazer isto. Tipicamente são aplicados para reduzir a tensão da bateria de automóveis para alimentar telefone móvel celular ou aparelho Digital Vídeo Disco (DVD), portátil, ou ainda para elevar a tensão de uma pilha de 1,5 V para 5 V para operar aparelhos eletrônicos.

Em todas estas aplicações deseja-se mudar o nível da tensão cc de forma que a perda no processo de conversão seja a menor possível, ou seja, com a máxima eficiência possível.

Um ponto importante sobre todos os conversores é que como um transformador eles mudam essencialmente o nível de tensão de um valor para outro, ou seja, toda energia provém da entrada, não há produção de energia no circuito conversor. Na verdade uma parcela da energia de entrada é utilizada pelos componentes do conversor para realizar o seu trabalho.

O fluxo de potência de um conversor pode ser representando pela Equação 13.

$$P_{ent} = P_{sai} + P_{perd} \quad (13)$$

Onde:

$P_{ent}$  = potência de entrada do conversor [W]

$P_{sai}$  = potência de saída do conversor [W]

$P_{perd}$  = potência perdida dentro do conversor [W]

Obviamente se não houver perdas no conversor, pode-se dizer que:  $V_{ent} \cdot I_{ent} = V_{sai} \cdot I_{sai}$ , ou seja, se houver um aumento da corrente na saída, a tensão será reduzida e vice-versa.

Certamente não existe conversor perfeito, desta forma trabalha-se o conceito de eficiência do conversor conforme a Equação 14.

$$E(\%) = \frac{P_{sai}}{P_{ent}} \quad (14)$$

Atualmente conversores que utilizam as novas técnicas de circuitos e componentes de última geração, atingem eficiência de 90%. A maioria dos demais conversores atinge eficiência na ordem de 80 a 85%. O que é muito bom quando comparado a eficiência da maioria dos transformadores padrões.

#### **3.1.10.1 Tipos de conversores**

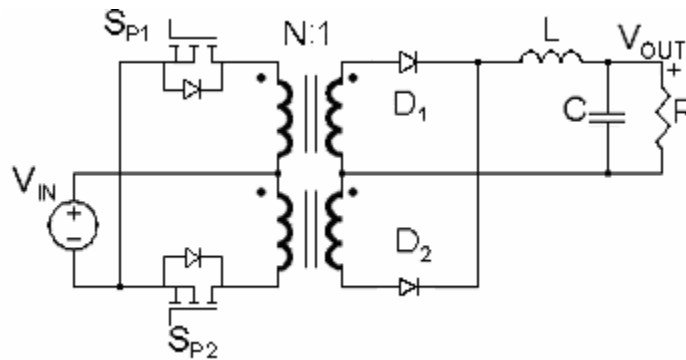
Existem muitos tipos diferentes de conversores, cada um tende a ser mais adequado para determinada aplicação. Há aqueles que são apropriados para abaixar a tensão de entrada, outros apropriados para elevar a tensão de entrada e aqueles que podem ser aplicados das duas formas anteriores. Um outro aspecto a ser observado nos conversores é a isolamento elétrica entre os circuitos de entrada e saída, que pode ser muito importante em algumas aplicações.

Conversores não isolados normalmente são utilizados quando se requer uma pequena taxa de redução ou elevação da tensão de saída (menor que 4:1) e isolamento entre entrada e saída não seja requerida. São exemplos de redução de voltagem: 24 V / 12 V, 5 V / 3 V e elevação de 1,5 V / 5 V. Existem cinco tipos básicos de conversores nesta categoria: *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk* e *charge pump*.

Conversores isolados são aplicados onde a saída necessita ser completamente isolada da entrada. Um exemplo deste tipo de aplicação é em áreas industriais, onde se deseja isolar o circuito de um sensor, normalmente localizado numa área classificada (local onde há presença de atmosfera inflamável) do conversor, normalmente localizado numa área não-classificada (local onde não há presença de atmosfera inflamável). Existem dois tipos básicos de conversor isolado: *flyback* e *forward*.

### 3.1.10.2 Conversor utilizado no protótipo

Neste trabalho será projetado um conversor isolado tipo *forward*, na configuração tipo *push pull*. O esquema deste tipo de conversor é mostrado na Figura 6.



**Figura 6: Circuito do conversor *push pull***  
**Fonte: ELECTUS DISTRIBUTION, 2001. (Adaptado)**

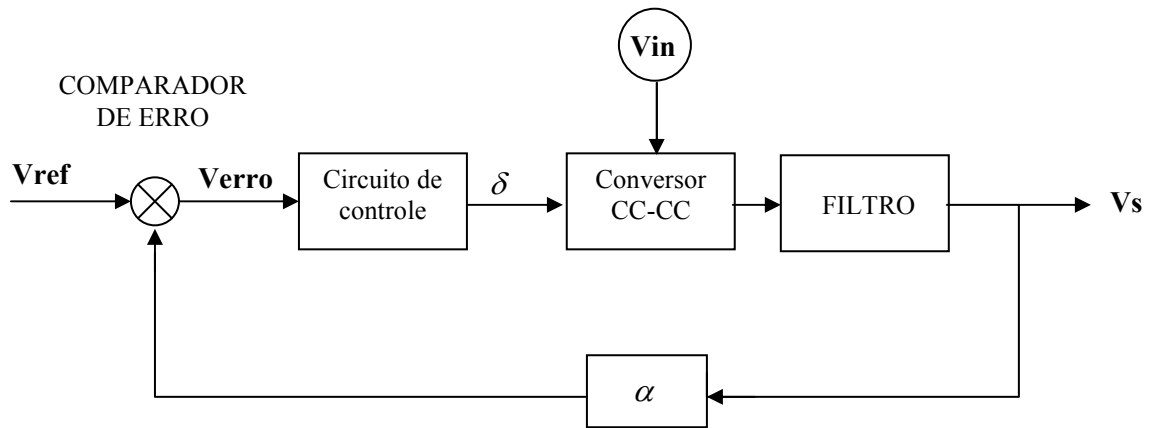
O funcionamento do circuito pode ser resumido da seguinte forma: a tensão de entrada  $V_{in}$  é aplicada na tomada central do transformador. O circuito de controle (não mostrado)

atua os transistores  $S_{P1}$  e  $S_{P2}$  separadamente. Assim uma onda ca quadrada é aplicada na entrada do transformador. Tem-se no secundário a tensão ca quadrada com amplitude alterada pela relação de transformação do transformador. Esta tensão será retificada pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , retornando a cc, que é então aplicada ao filtro de saída LC e carga, (ELECTUS DISTRIBUTION, 2001).

### 3.1.10.3 Circuito de controle

Num conversor, o valor do parâmetro  $\delta$  (largura do pulso de chaveamento) dever ser corrigido continuamente para evitar variações na tensão, quando da ocorrência de uma variação de tensão de entrada ou na carga (para manter a tensão de saída estável).

Esta correção e geração de  $\delta$  é feita por circuitos de controle de largura de pulso. A Figura 7 mostra o diagrama de blocos da conversão cc-cc com o circuito de controle de  $\delta$ .



**Figura 7: Diagrama de blocos do conversor cc-cc com circuito de controle de  $\delta$**   
**Fonte: MELLO, 1988. (Adaptado)**

No diagrama da Figura 7, a tensão de saída  $V_s$  é atenuada pelo bloco  $\alpha$  e é comparada com uma tensão de referência ( $V_{ref}$ ) que por sua vez, gera uma tensão de erro ( $V_{erro}$ ) que vai ao circuito de controle de onde se obtém  $\delta$ . O bloco conversor cc-cc é o circuito de conversão ilustrado na Figura 6. O filtro é composto pelo circuito LC da saída do conversor. Assim o conversor é formado por uma malha com realimentação negativa que visa manter constante a tensão de saída  $V_s$ , (MELLO, 1988).

O circuito de controle de largura de pulso utilizado nos conversores atualmente são circuitos integrados que requerem a definição de vários parâmetros externos, relativos ao projeto, para desempenharem corretamente a sua função. No trabalho será utilizado o circuito TL 494, fabricado pela empresa *Texas Instruments*<sup>®</sup>, cujas informações técnicas sobre o funcionamento encontram-se no apêndice B.

### 3.1.11 Cogeração

A cogeração consiste na produção simultânea de energia térmica e energia elétrica a partir do uso de um combustível convencional (gás natural, óleo combustível, diesel e carvão) ou algum tipo de resíduo industrial (madeira, bagaço de cana, casca de arroz etc).

Na cogeração pode se alcançar um rendimento de até 80% de energia contida no combustível. Esta energia pode ser transformada em vapor, eletricidade, força motriz, e frio, sendo ainda possível a produção de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) a partir da descarga dos gases de combustão.

A cogeração é aplicável em instalações que necessitem simultaneamente de energia térmica e elétrica, em diversos segmentos:

Indústria: alimentos, bebidas, química, petroquímica, papel e celulose, cerâmica, farmacêutica;

Comércio: shopping centers, supermercados, complexos comerciais;

Serviços: hospitais, hotéis, aeroportos, grandes condomínios.

São vantagens da cogeração: auto-suficiência energética, qualidade da energia elétrica, melhoria da eficiência energética do processo, redução dos impactos ambientais e foco na atividade principal da empresa. No apêndice C, encontram-se informações acerca da legislação de cogeração no Brasil.



### **3.1.12 Balanço global de energia**

#### **3.1.12.1 Introdução**

Serão descritas as considerações adotadas para o balanço global de energia realizado a partir da configuração da unidade GTE proposta, para se determinar a eficiência global do sistema.

#### **3.1.12.2 Eficiência energética**

Entende-se por eficiência energética o uso racional da energia, observando a relação custo benefício, sem abrir mão do conforto proporcionado por ela. Pode ser traduzida também no conjunto de práticas e políticas que reduza os custos com energia e/ou aumente a quantidade de energia oferecida sem alteração da geração.

#### **3.1.12.3 Rendimento térmico com cogeração**

Na prática, calcula-se o rendimento térmico do ciclo com cogeração, somando-se o total de energia utilizada, ou seja, a energia elétrica gerada mais a energia térmica utilizada no processo, dividindo-se pelo total da energia fornecida pelo combustível.

Entretanto, do ponto de vista técnico, esta forma de avaliação do rendimento não é adequada, pois são consideradas formas diferentes de energia (térmica e mecânica) do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica. Isto porque, conforme a segunda lei, calor nunca pode ser integralmente convertido em trabalho, enquanto que a recíproca é sempre verdadeira.

### 3.1.13 Balanço energético global do protótipo

#### 3.1.13.1 Energia fornecida

A energia fornecida é a energia química contida no combustível GLP, composto de uma mistura de 50% de propano e 50% de butano, adquirido em fornecedores na rede de distribuição de gás engarrafado, no caso do botijão de 13 kg, e em loja de artigos para *camping*, no caso do invólucro descartável de 190 g para utilização em lampião.

#### 3.1.13.2 Energia útil

O protótipo projetado deve fornecer: energia luminosa obtida na combustão do GLP na camisa do lampião, energia elétrica obtida no módulo semicondutor e a energia térmica nos trocadores de calor dos estágios de cogeração.

Assim o balanço global de energia do protótipo pode ser obtido da Equação 15.

$$P_c = P_m + P_t + P_i + P \quad (15)$$

Onde:

$P_c$  = Potência fornecida pelo combustível

$P_m$  = Potência útil disponibilizada pelo módulo termoeletrico

$P_t$  = Potência útil retirada dos trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração

$P_i$  = Potência equivalente de iluminação útil disponibilizada pela camisa do lampião

$P$  = Perdas diversas do sistema

E a eficiência global do protótipo através da Equação 16.

$$\eta = \frac{P_m + P_t + P_i}{P_c} \quad (16)$$

## **CAPÍTULO 4**

### **4.1 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.1.1 Metodologia**

A unidade GTE multi-funções utiliza lampião a GLP para funcionar como fonte de calor e iluminação. Um módulo semicondutor comercial de 14 W, modelo HZ-14 converterá o gradiente térmico em energia elétrica. O calor residual dos gases de saída do lampião aquecerá água que circula através de dois trocadores de calor que compõe o sistema de cogeração e estarão ligados a um reservatório de 20 litros. Um conversor eletrônico elevador cc-cc de potência, será projetado e construído para regulação inteligente da tensão de saída para carga de uma bateria. Um sistema de monitoramento de temperatura indicará a ação do controle humano para modulação de chama e proteção do módulo contra temperatura alta. Instrumentos serão instalados para medição e análise de eficiências do sistema.

Neste capítulo será apresentado o esquema resumido da unidade GTE, objeto do trabalho. Serão descritos todos os componentes e suas características, métodos e procedimentos para realização da parte experimental, projetos e adaptações dos componentes, equipamentos, instrumentação e a metodologia empregada no ensaio.

#### **4.2 Esquema da unidade GTE proposta**

A Figura 8 ilustra os componentes da unidade GTE proposta. Abaixo a descrição dos componentes:

1. Fonte de calor – Lampião a GLP (botijão de gás comercial de 13 kg ou cartucho descartável de 190 g).
2. Fonte quente – suporte do trocador de calor, parte inferior.
3. Fonte fria – suporte do trocador de calor, parte superior.

3. Trocador de calor (fonte fria) – usinado em bloco de alumínio, fabricado no Laboratório de Energia do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (CT-UFRN), compõe o 1º estágio de cogeração. Demais dados no apêndice D.

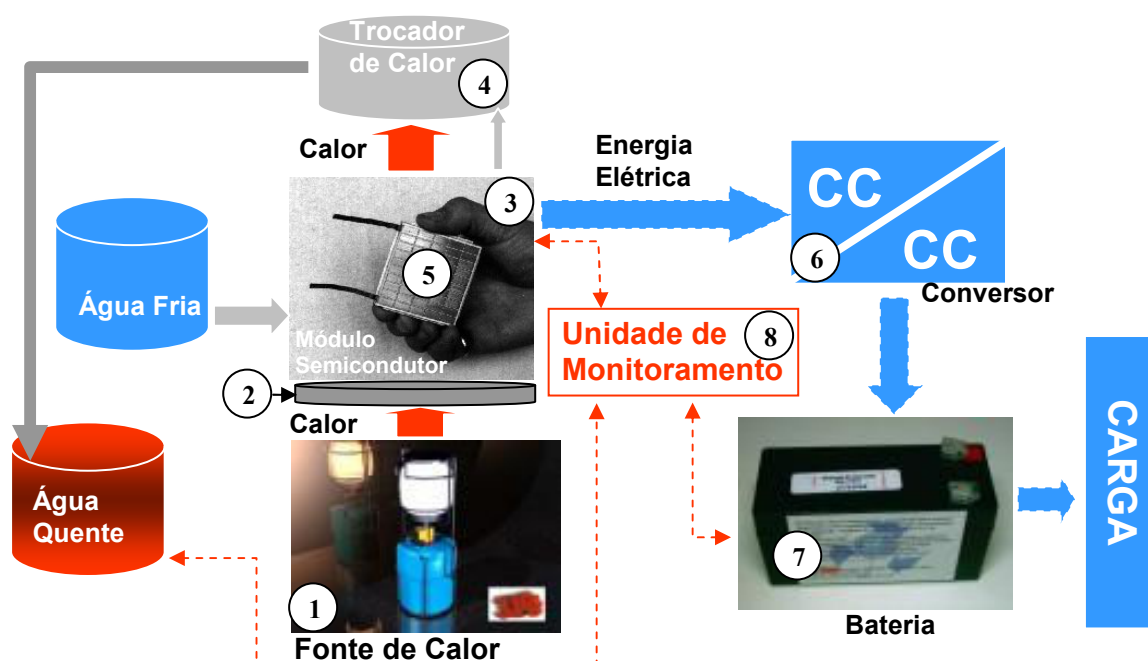


Figura 8: Esquema resumido da unidade GTE proposta

4. Trocador de Calor (2º estágio de cogeração) – Trocador de calor de cobre fabricado no laboratório de energia do CT-UFRN. Demais dados no apêndice E.

5. Módulo Semicondutor – módulo comercial modelo HZ -14.

6. Conversor cc-cc – conversor *push pull*.

7. Bateria – tipo descarga profunda.

8. Unidade de Monitoramento:

- registrador *Field Logger*<sup>®</sup> com termopares tipo “T”, para aquisição das temperaturas.

- micro computador com *software Field Chart*<sup>®</sup> para registro das temperaturas.

- multímetro.

- luxímetro.

#### **4.2.1 Descrição das partes da unidade GTE proposta**

Para obtenção da unidade GTE, são necessários as fontes quente e fria, para produzir o gradiente térmico. O módulo semicondutor para conversão da energia térmica em elétrica. Os trocadores de calor para aquecimento de água em processo de cogeração, a partir do calor absorvido dos gases da combustão. Complementa a unidade um conversor cc-cc tipo *push pull* para elevar a tensão elétrica gerada no módulo a níveis comerciais.

A fonte quente é obtida do calor residual produzido na combustão do gás proveniente do botijão. A fonte fria é obtida do resfriamento do trocador de calor projetado para este fim. O módulo semicondutor é comercial e foi adquirido no mercado.

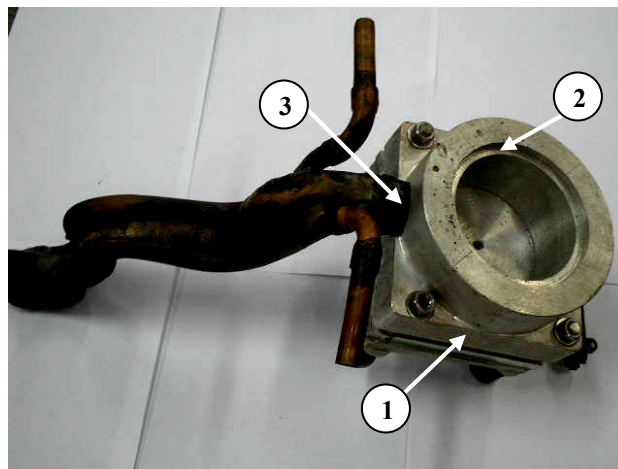
A seguir será feita a descrição de tais elementos utilizados na unidade proposta com respectiva ilustração. Ao final serão descritos o sistema de isolamento e os ajustes preliminares.

#### **4.2.2 Fonte de calor**

A fonte de calor utilizada no sistema proposto é um botijão comercial de 13 kg de GLP. Para adequar a pressão do botijão ao sistema e permitir ajuste da pressão do gás, foi adaptado, na saída do botijão, um regulador de pressão com respectivo indicador. Durante a operação a pressão foi mantida no valor de 2 bar ( 200 kPa).

#### **4.2.3 Fontes quente e fria**

Para obtenção da fonte quente fabricou-se um cabeçote de alumínio no qual foi feito um rebaixo para adaptar o vidro do lampião. O módulo termoeletrico foi instalado na parte superior do mesmo. O cabeçote possui um furo de 32 mm, ao qual foi rosqueado um tubo de cobre para permitir a condução dos gases quentes para o ambiente. A vista inferior do cabeçote com os detalhes estão ilustrados na Figura 9.

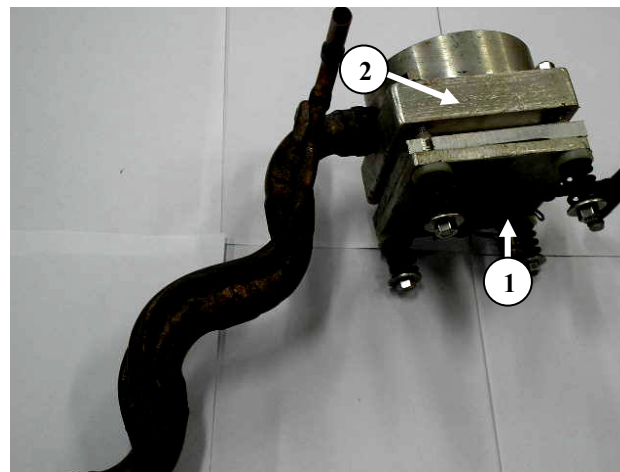


#### LEGENDA

1. Fonte quente (parte superior do cabeçote)
2. Rebaixo para adaptação do vidro do lampião
3. Saída de gases quentes para o meio ambiente

**Figura 9: Vista inferior do cabeçote: fonte quente, rebaixo para adaptação do vidro do lampião e saída de gases quentes para o meio ambiente**

Para obtenção da fonte fria, projetou-se um trocador de calor que foi fixado ao cabeçote, por meio de parafusos e molas, para garantir a compressão ideal do módulo termoelétrico. O trocador de calor foi usinado em um bloco de alumínio, de modo a permitir a circulação de água através de suas conexões de entrada e saída, a fim de manter o lado frio do módulo, sempre a temperatura mais baixa. A Figura 10 ilustra a vista lateral do cabeçote de modo a expor as fontes fria e quente. Vale ressaltar que o cabeçote e o trocador foram projetados e construídos no laboratório de energia da UFRN.



#### LEGENDA

1. Fonte fria
2. Fonte quente

**Figura 10: Vista lateral do cabeçote: fontes fria e quente**

Este trocador compõe o 1º estágio do sistema de cogeração.

O trocador de calor utilizado no 2º estágio de cogeração no GTE foi projetado com serpentina feita com tubo de cobre de 20 mm, soldado externamente ao tubo de saída de gases quentes. A Figura 11 ilustra os dois trocadores.

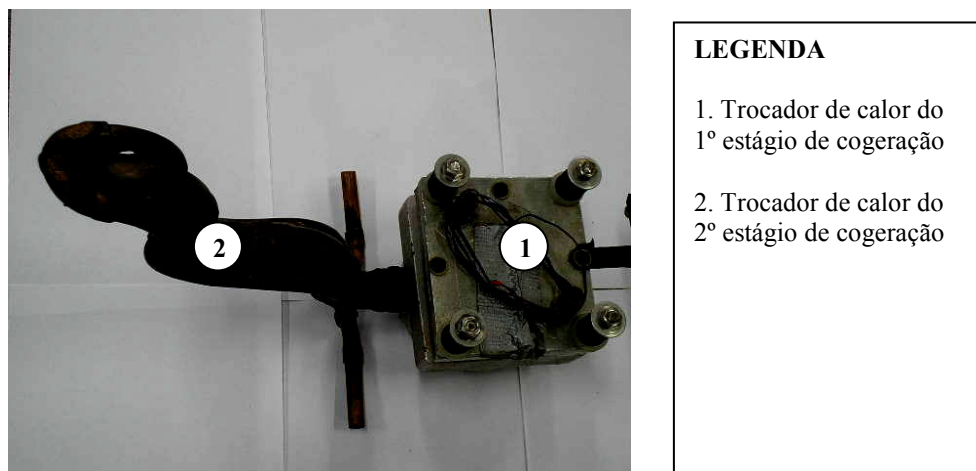
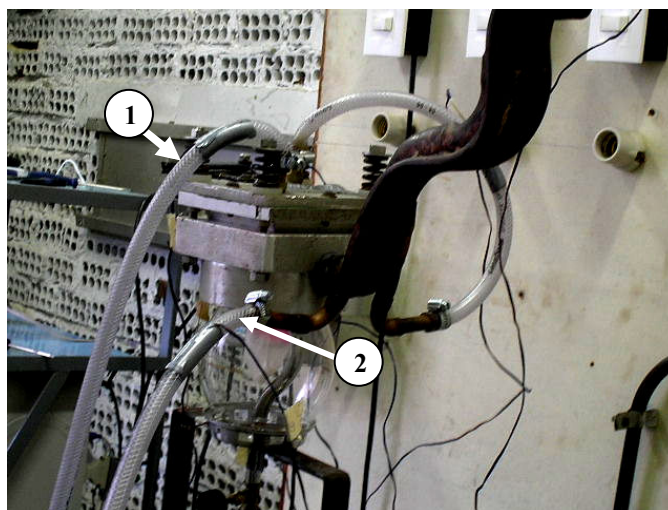


Figura 11: Trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração

#### 4.2.4 Sistema de refrigeração

Para execução da refrigeração da fonte fria e aquecimento de água, foi providenciado um circuito de água, utilizando-se mangueira de plástico reforçada com nylon, como ilustra a Figura 12. A regulação da vazão foi feita manualmente através de válvula do tipo gaveta, disponível no ponto de alimentação de água.



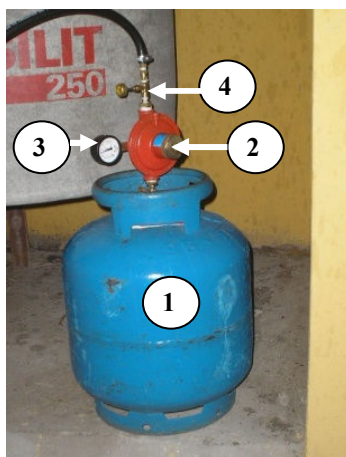
#### LEGENDA

1. Entrada de água fria
2. Saída de água quente

**Figura 12: Sistema de refrigeração da unidade GTE**

### 4.2.5 Sistema de alimentação de gás

A alimentação de gás, para a partida e teste da unidade, foi obtida de um botijão de 13 kg, instalado na parte externa do laboratório, composto de válvula reguladora de pressão de gás, indicador de pressão de gás e válvula de bloqueio de gás. Conectado ao lampião por meio de mangueira de borracha de 3/8", especificada para suportar pressão de 500 PSI (3,447 MPa), conforme pode ser visto na Figura 13.



#### LEGENDA

1. Botijão de 13 kg
2. Válvula reguladora de pressão de gás
3. Indicador de pressão de gás
4. Válvula de bloqueio de gás

**Figura 13: Alimentação de gás**



#### 4.2.6 Sistema de iluminação

A iluminação foi obtida a partir da liberação de luz proveniente da reação de combustão entre o gás e o ar na camisa do lampião. Na unidade proposta foi utilizada uma camisa de 500 velas (1 vela = 12 lm) marca *Aladdin*<sup>®</sup>. A Figura 14 ilustra a camisa utilizada no lampião sob teste.

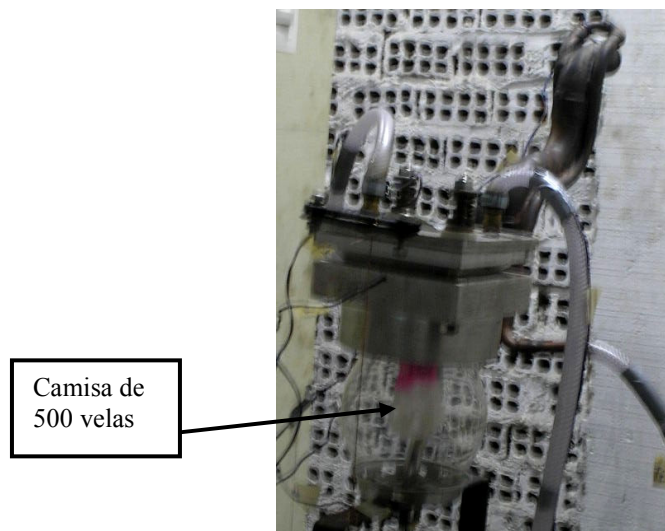


Figura 14: Camisa de 500 velas *Aladdin*<sup>®</sup>

#### 4.2.7 Módulo termoeletrico

Na conversão de energia térmica em elétrica a partir da diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, utilizou-se o módulo termoeletrico, HZ-14, ilustrado na Figura 15.

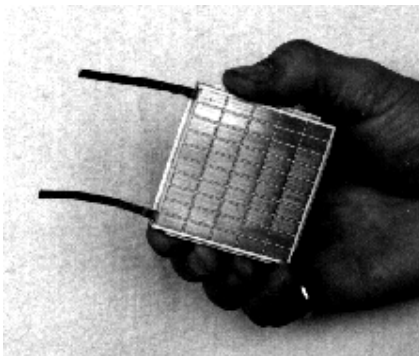
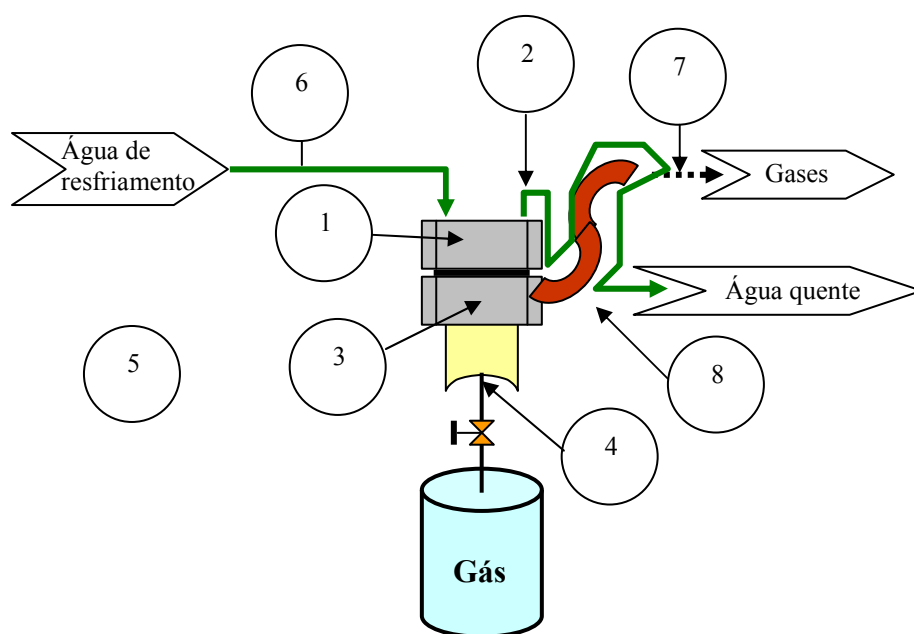


Figura 15: Módulo termoeletrico HZ -14  
Fonte: LEAVITT, 2003.

Este módulo foi importado dos EE.UU por não existir similar no Brasil.

#### 4.2.8 Sistema de monitoração de temperaturas

A análise de eficiência da unidade GTE é obtida a partir dos cálculos de conversão de energia. Visando obter informações sobre o fluxo térmico da unidade, foram utilizados sensores de temperatura, termopar tipo “T”, instalados em 8 pontos da unidade, conforme indicado no esquema da Figura 16, que ilustra a localização exata de cada termopar na unidade GTE. A Tabela 1 indica o ponto de medição e o respectivo termopar.



**Figura 16: Localização dos termopares na unidade GTE**

**Tabela 1: Pontos de medição de temperatura**

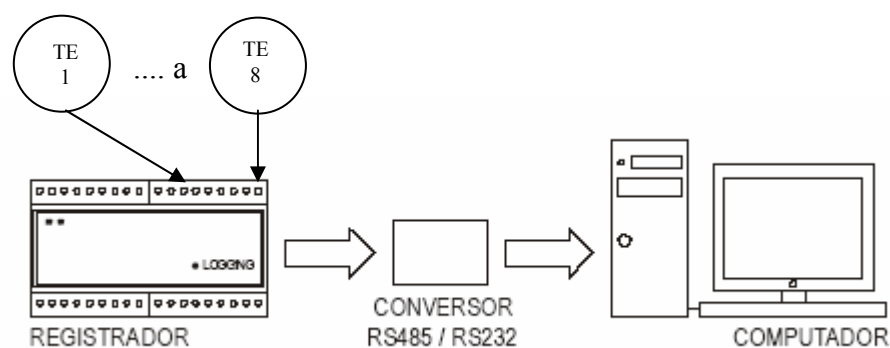
Termopar	Ponto de medição
1	Temperatura da fonte fria
2	Temperatura da água de saída do trocador de calor da fonte fria
3	Temperatura da fonte quente
4	Temperatura do ar de entrada

Continuação da Tabela 1:

5	Temperatura ambiente
6	Temperatura da água de entrada
7	Temperatura dos gases de saída
8	Temperatura da água de saída

#### 4.2.9 Sistema de medição, aquisição e registro de temperatura

A Figura 17 ilustra o esquema completo do sistema de medição e aquisição de temperaturas.



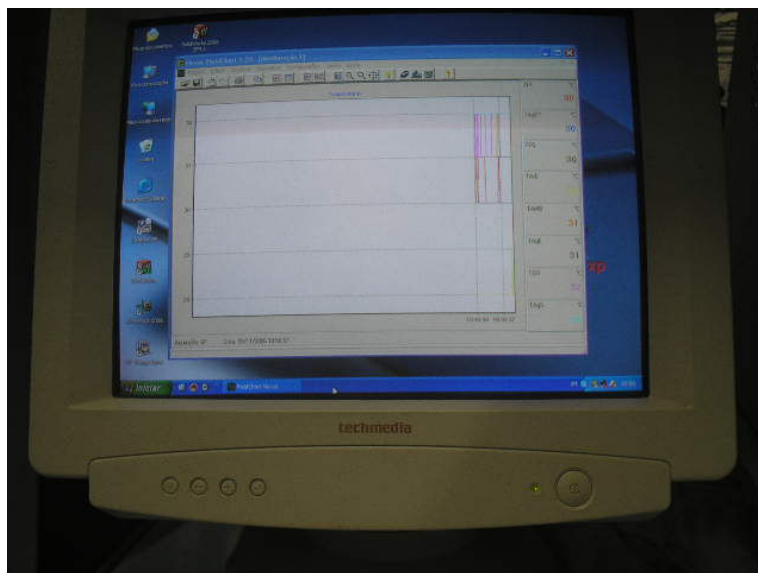
**Figura 17:** Esquema de ligação do sistema de medição, aquisição e registro de temperatura  
**Fonte:** NOVUS, 2003. (Adaptado)

Na aquisição das temperaturas da unidade GTE, os termopares foram interligados aos respectivos canais de número 1 a 8 do *Field Logger*®. Este interligado a CPU, na porta de comunicação 1, através de um conversor EIA 485 para EIA 232C. A Figura 18, ilustra o aspecto frontal do *Field Logger*® com respectivos termopares instalados.



**Figura 18:** Vista frontal do *Field Logger*®

A Figura 19 ilustra a tela de monitoração do software *Field Chart*®, utilizado para indicação e registro das temperaturas da unidade GTE.



**Figura 19:** Tela de monitoração do *Field Chart*®

#### 4.2.10 Conversor cc-cc

Nas condições de projeto o módulo termoeletrico HZ-14 gera voltagem de circuito aberto de 3,5 Vcc, quando submetido a uma diferença de temperatura de 200 °C. A expectativa é que o módulo quando aplicado no protótipo sob carga gere no mínimo 1,5 e no máximo 2,5 Vcc.

A proposta é que a unidade seja capaz de elevar a voltagem elétrica gerada no HZ-14 para 12 Vcc, para carregar uma bateria de 12 Vcc, e iluminar o ambiente. Neste contexto, foi necessário projetar um conversor cc-cc, tipo *push pull*, de baixo consumo, para proporcionar a elevação da tensão. A Figura 20 ilustra o esquema do circuito da etapa de potência proposto, a Figura 21 ilustra o circuito do controlador de  $\delta$  (largura do pulso) e por fim a figura 22 ilustra o conversor montado em placa tipo matriz, fabricada em de fibra de vidro. Mais detalhes sobre o circuito do conversor pode ser verificado no apêndice F.

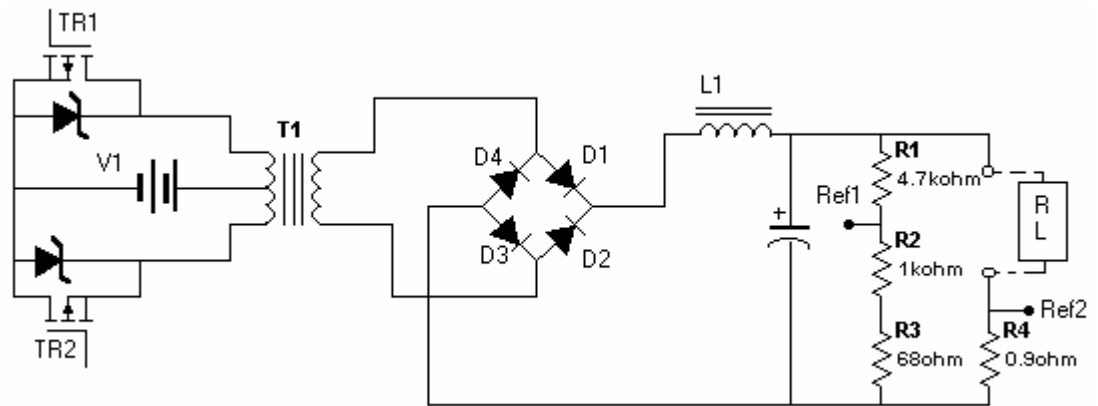


Figura 20: Etapa de potência do conversor cc-cc *push pull*

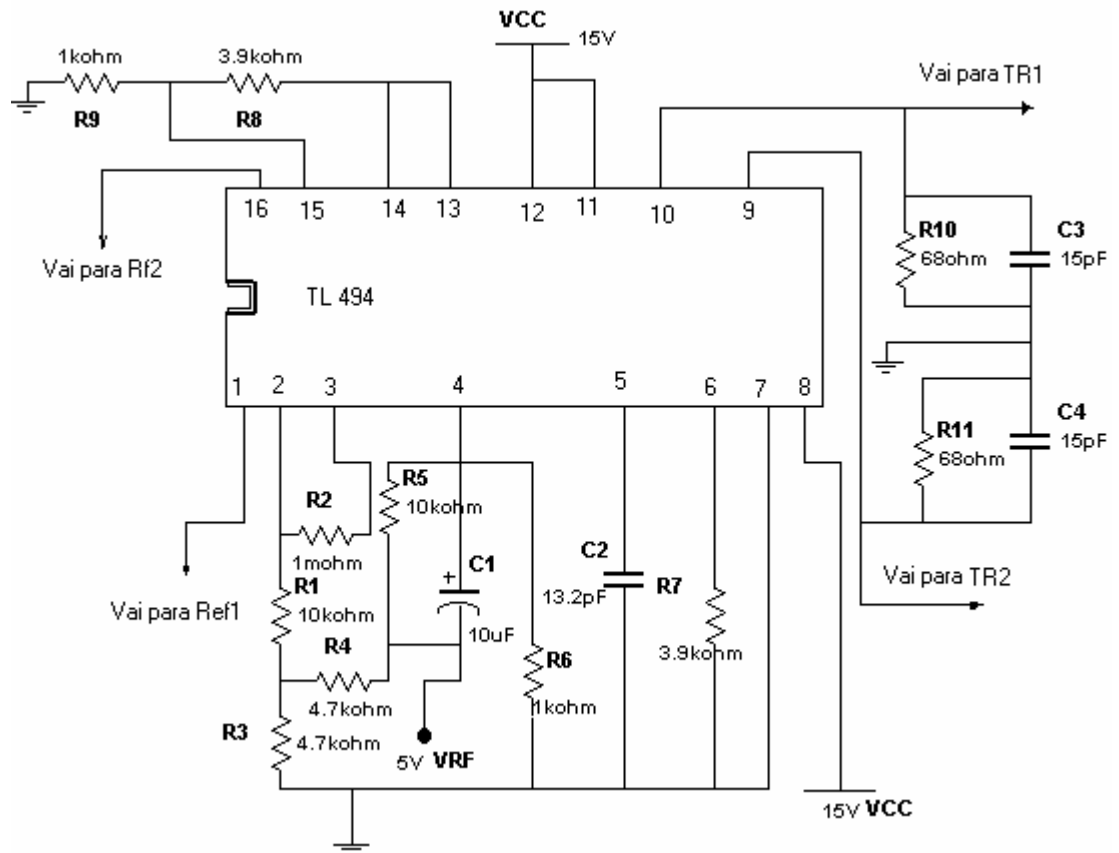
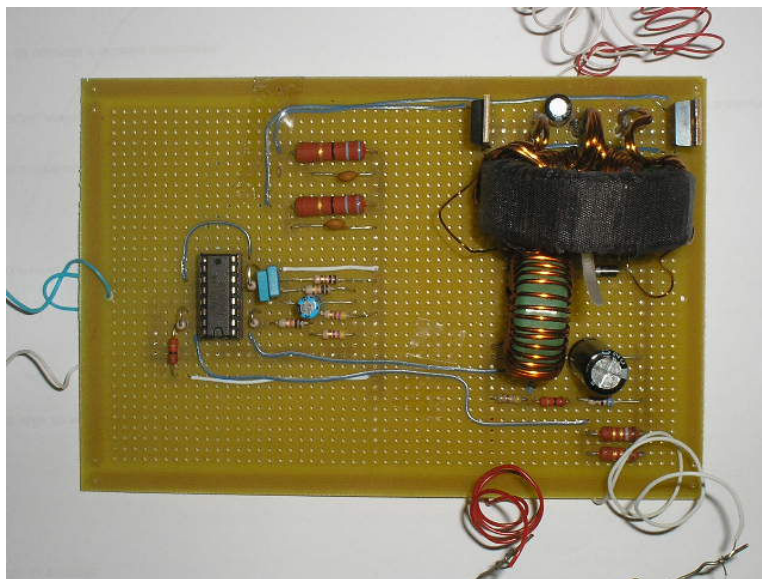


Figura 21: Esquema do circuito controlador de  $\delta$  proposto para o conversor cc-cc



**Figura 22: Conversor cc-cc montado em placa de fibra de vidro**

### 4.3 Descrição das instalações de ensaio

A unidade GTE foi instalada no do Laboratório de Energia do Núcleo de Tecnologia Industrial da UFRN. As Figuras 23 e 24 ilustram a disposição do aparato experimental na bancada de teste.

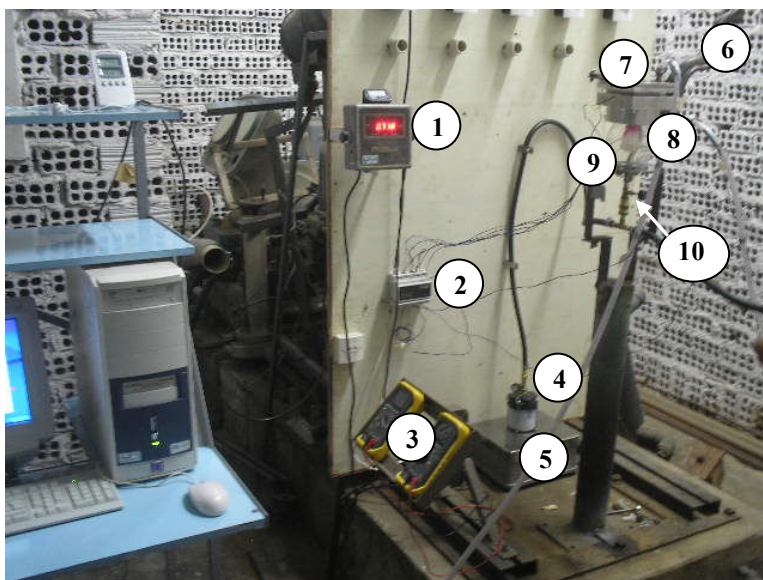


Figura 23: Aparato experimental

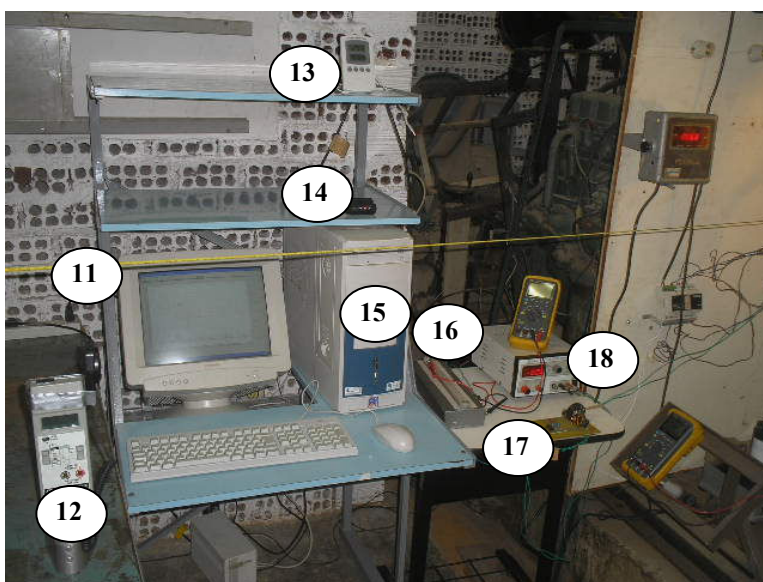


Figura 24: Aparato experimental (continuação)

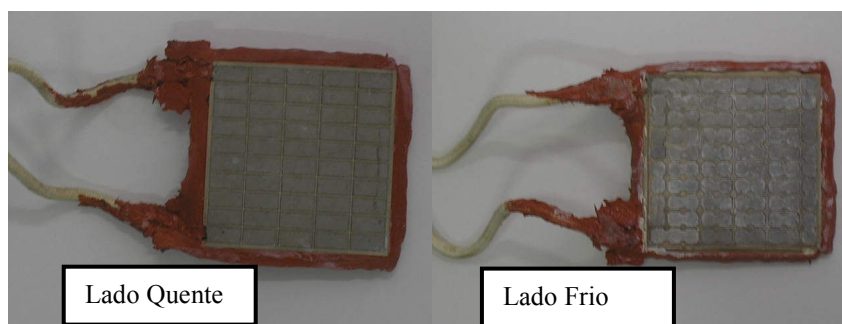
#### LEGENDA

1. Indicador digital da balança
2. *Field Logger*
3. Multímetros
4. Cartucho de gás (190 g)
5. Prato da balança digital
6. Trocador de calor 2º estágio de cogeração
7. Trocador de calor 1º estágio de cogeração e fonte fria
8. Fonte quente
9. Lâmpião
10. Válvula de ajuste de vazão de gás
11. Trena metálica de 3 m
12. Luxímetro
13. Termohigrômetro
14. Cronômetro digital
15. CPU - Aquisição e registro de temperatura
16. Resistor de fio
17. Conversor cc-cc
18. Fonte de alimentação



#### 4.4 Procedimento de montagem

A montagem da unidade foi realizada de forma criteriosa. Inicialmente montou-se o trocador de calor do 2º estágio de cogeração. Em seguida fez-se a instalação da camisa do lampião, procedimento realizado sem a necessidade de ferramentas especiais, a seguir a instalação do vidro. Nesta etapa foi necessário ajustar o comprimento do parafuso de fixação da tampa para adequá-lo ao comprimento do vidro e ao furo que foi realizado no cabeçote de alumínio utilizado como fonte quente. O módulo foi instalado entre as fontes quente e fria, observando os respectivos lados indicados na Figura 25. Para impedir a formação de bolsões de ar e melhorar o processo de transferência de energia térmica, ambos os lados do módulo foram uniformemente recobertos com pasta de silício. A isolamento elétrica do módulo foi obtida colocando-se almofadas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre os lados quente e frio do módulo, e respectivas fontes quente e fria. O processo de fixação do módulo foi concluído após aplicação de torque com igual intensidade aos 4 parafusos de fixação da fonte fria, o que garantiu a pressão necessária para fixar o módulo, na montagem tipo *sandwich*, entre as fontes quente e fria.



**Figura 25: Módulo termoeletrico HZ -14, lado quente e lado frio**

Após a conclusão das etapas descritas, a unidade estava pronta para instalação na bancada de teste. Para este fim providenciou-se um suporte tipo garfo, no qual foram realizados dois furos. Por estes furos, dois parafusos tipo borboleta fixaram a parte inferior do conjunto ao suporte. As conexões de água e gás foram interligadas a unidade, os termopares foram instalados e, para finalizar a montagem providenciou-se o isolamento térmico.



#### 4.5 Isolamento térmico da unidade

O isolamento térmico da fonte quente e do trocador de calor de cobre foi realizado com lã de rocha, devido a sua excelente propriedade isolante, incombustível e não cancerígena. O acabamento foi realizado com *Silver Tape*®. O aspecto final da unidade pode ser conferido na Figura 26.

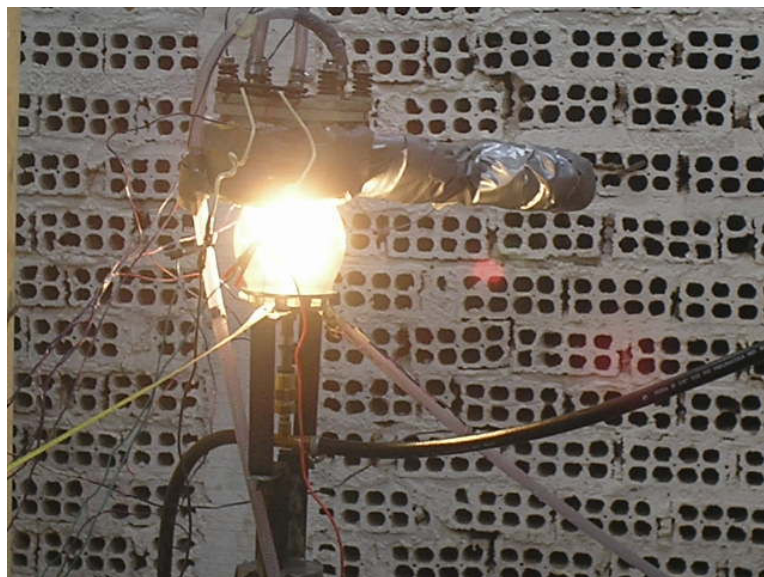


Figura 26: Aspecto da unidade GTE após isolamento térmico

#### 4.6 Procedimentos de ensaio

##### 4.6.1 Ajustes preliminares

Para início dos testes foram realizados os ajustes iniciais da unidade: ajuste da vazão de água de refrigeração e pressão do gás combustível, conforme descrito a seguir.

##### 4.6.2 Vazão de água de resfriamento

A vazão de água foi estabelecida a partir da abertura e regulagem da válvula existente no ponto de alimentação de água do laboratório. Inicialmente foi estabelecido um fluxo de água

aleatório, porém suficiente para produzir o resfriamento do módulo. A Figura 27 ilustra o *becker* calibrado que foi utilizado para coleta e medição da vazão de água de resfriamento.



Figura 27: *Becker* calibrado para medição da vazão de água de resfriamento

#### 4.6.3 Ajuste da pressão de gás

A pressão do gás de saída do botijão foi controlada em 2 bar (200 kPa), através da válvula reguladora de pressão instalada no botijão, conforme ilustrado na Figura 13.

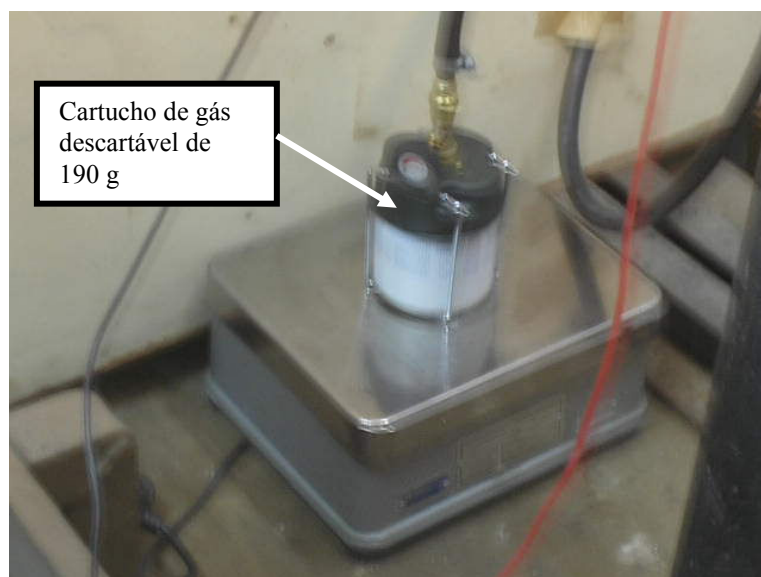
#### 4.6.4 Pré-operação da unidade

Após conclusão da montagem da unidade, instalação do sistema de gás, sistema de refrigeração e termopares para medição de temperatura a unidade GTE foi submetida a uma observação e teste de vazamento de gás, sendo em seguida iniciado o teste de aquecimento para avaliação do seu desempenho. A temperatura do módulo, a temperatura dos gases de combustão, a temperatura da água de saída, o nível da iluminação e a voltagem gerada pelo módulo foram avaliadas antes do ensaio.

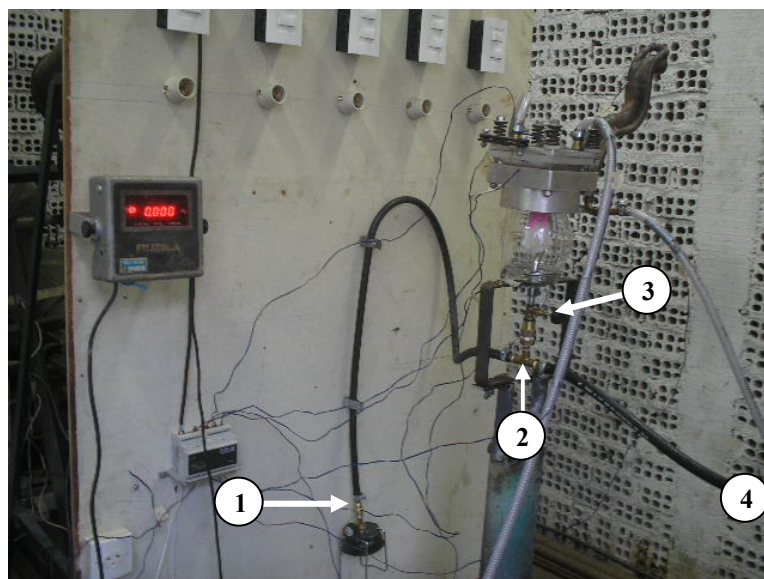
#### 4.6.5 Ensaio

A proposta inicial era fazer ensaios em pelo menos três condições de carga, a saber: carga mínima, carga média e carga máxima. Porém o teste preliminar indicou que não seria possível obter as três condições, uma vez que o diferencial de temperatura necessário para obtenção da tensão de circuito aberto do módulo de 3,5 V não seria atingido nas condições de ensaio.

Após a pré-operação o sistema foi desligado para resfriamento, e substituição da fonte de gás. Um sistema alternativo de alimentação de gás foi utilizado. Este sistema era composto de um cartucho de gás descartável, de 190 g, conforme ilustrado na Figura 28, que foi interligado ao lampião através de uma conexão tê e mangueiras de borrachas de 3/8", especificadas para suportar pressão da ordem de 300 PSI (2,068 MPa). Os detalhes da instalação são mostrados na Figura 29. A regulação da vazão de gás foi feita manualmente ajustando-se a válvula agulha na entrada do lampião. Girando-a no sentido horário, reduz-se a vazão de alimentação do gás.



**Figura 28: Alimentação de gás com cartucho de 190 g**

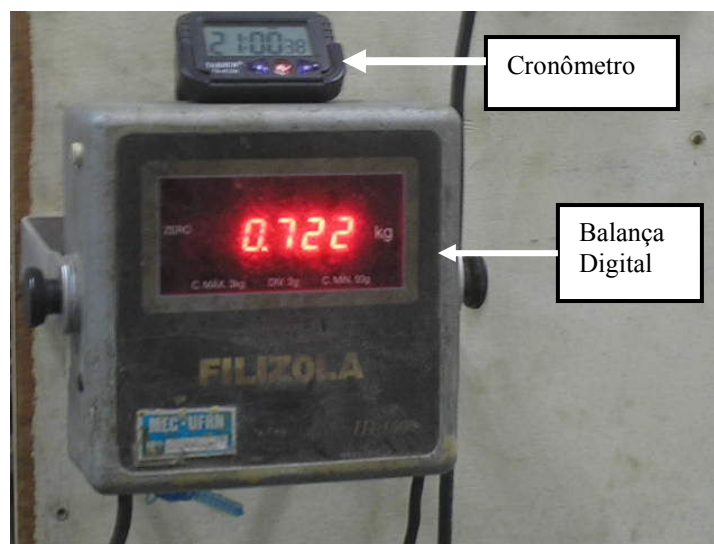


#### LEGENDA

1. Gás do cartucho de 190 g
2. Tê para interligação das duas fontes de gás
3. Válvula de ajuste de vazão de gás para o lampião
4. Gás do botijão de 13 kg

**Figura 29: Detalhes da alimentação de gás**

Com o objetivo de analisar o desempenho e eficiência da unidade GTE, a vazão em massa do gás consumido pelo lampião foi determinada com o auxílio de uma balança digital, e um cronômetro, veja Figura 30. Com o cronômetro mediu-se o tempo para consumo de uma massa de 20 g. Quatro valores foram tomados, as vazões foram calculadas. Considerou-se a vazão da unidade igual a média aritmética entre as quatro medidas realizadas.



**Figura 30: Instrumentos para medição da vazão de gás**

A unidade foi posta em operação por um período de 2 h 15 min. Quando a unidade atingiu o regime permanente, foram realizadas as medidas das vazões de água e gás, corrente e voltagem do módulo termoeletrico, iluminação do ambiente e temperaturas da unidade. As técnicas utilizadas na medição e os resultados obtidos em tais medições serão expostos a seguir.

## **4.7 Dados obtidos**

### **4.7.1 Dados medidos**

#### **4.7.1.1 Volume de água de refrigeração versus o tempo de escoamento**

Para determinação da vazão de água de refrigeração, calculou-se a média aritmética das quatro medidas realizadas em um *becker* com volume calibrado. O tempo de escoamento da água foi medido com um cronômetro de precisão.

#### **4.7.1.2 Massa de gás versus o tempo de escoamento**

Para determinação da vazão de gás, calculou-se a média aritmética das quatro medidas realizadas em uma balança de precisão. Com a balança foi possível obter a variação da massa de gás durante a operação da unidade: massa de gás inicial (**mg<sub>i</sub>**) e massa de gás final (**mg<sub>f</sub>**). O tempo de escoamento do gás foi medido com um cronômetro de precisão.

#### **4.7.1.3 Corrente versus voltagem gerada pelo módulo termoeletrico**

O circuito foi composto de um multímetro ligado em série, na função de amperímetro, e um outro ligado em paralelo com a função de voltímetro. Foram feitas leituras de corrente e voltagem simultaneamente para possibilitar o cálculo da potência fornecida pelo módulo termoeletrico.

#### 4.7.1.4 Temperaturas da unidade

Uma das grandezas mais importantes para determinação da energia térmica envolvida em sistemas térmicos é temperatura. Assim, foi instalado um sistema de aquisição simultâneo, para a entrada e saída de cada elemento importante para o balanço deste estudo. Os termopares com respectivos pontos de medição podem ser vistos na Tabela 01 e na Figura 16.

#### 4.7.1.5 Iluminância

A iluminância foi medida utilizando-se um luxímetro de marca Lutron, modelo Light meter 102. Os valores foram tabelados para realização das análises necessárias a obtenção da função de distribuição de luminosidade, para a partir dela estimar-se a potência equivalente de iluminação útil. Esta potência será utilizada no balanço global e cálculo de eficiência do lâmpião e da unidade GTE.

### 4.7.2 Dados calculados

#### 4.7.2.1 Vazão de água de resfriamento

A vazão de água foi obtida calculando-se inicialmente a vazão para cada amostra coletada, utilizando a Equação 17.

$$q_n = \frac{v}{t} \quad (17)$$

Onde:

$q_n$  = vazão volumétrica para as amostras de 1 a 4 [ml/min]

$v$  = volume de água [ml]

$t$  = tempo de escoamento [min]

A vazão média foi obtida com a Equação 18.

$$q_{ar} = \frac{\sum_{n=1}^4 q_n}{4} \quad (18)$$

Onde:

$q_{ar}$  = vazão volumétrica média de água [ml/min]

$q_n$  = vazão volumétrica calculada para as quatro amostras [ml/min]

A vazão volumétrica média de água foi convertida para vazão mássica, usando a relação de conversão da Equação 19.

$$\dot{m}_a = q_{ar} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 1,666E-5 \quad (19)$$

Onde:

$\dot{m}_a$  = vazão mássica média de água [kg/s]

$q_{ar}$  = vazão volumétrica de água [ml/min]

$\rho_{H_2O}$  = densidade da água [kg/m<sup>3</sup>]

$1,666E-5$  = fator de conversão

#### 4.7.2.2 Vazão de gás

A obtenção da vazão de gás seguiu a mesma sistemática utilizada para a obtenção da vazão de água. Mediu-se quatro amostras de massa de gás no intervalo de tempo de 20 min. A Equação 20 foi utilizada para calcular a vazão em cada amostra.

$$\dot{m}_n = \frac{m_{gf} - m_{gi}}{t_{eg}} \quad (20)$$

Onde:

$\dot{m}_n$  = vazão mássica de gás para cada amostra de 1 até 4 [g/min]

$m_{gf}$  = massa final do gás [g]

$m_{gi}$  = massa inicial do gás [g]

$t_{eg}$  = tempo de escoamento do gás [min]

A vazão mássica média de gás foi calculada através da Equação 21.

$$\dot{m}_g = \frac{\sum_{n=1}^4 \dot{m}_n}{4} \quad (21)$$

Onde:

$\dot{m}_g$  = vazão mássica média de gás [g/min]

$\dot{m}_n$  = vazão mássica de gás calculada para as quatro amostras [g/min]

Fator de conversão da vazão mássica de gás de [g/min] para [kg/s] = 1,666E-5

#### 4.7.2.3 Potência fornecida pelo combustível

O cálculo da potência fornecida pelo combustível foi obtido através da Equação 22.

$$P_c = \dot{m}_g . PCI \quad (22)$$

Onde:

$P_c$  = potência fornecida pelo combustível [W]

$\dot{m}_g$  = vazão mássica média de gás [kg/s]

$PCI$  = poder calorífico inferior do combustível [J/kg]

#### 4.7.2.4 Potência do módulo termoeletrico

O cálculo da potência do módulo termoeletrico foi obtido através da Equação 23.

$$P_m = U . I \quad (23)$$



Onde:

$P_m$  = potência útil fornecida pelo módulo termoeletrico [W]

$U$  = voltagem gerada pelo módulo termoeletrico [V]

$I$  = corrente elétrica gerada pelo módulo [A]

#### 4.7.2.5 Potência dos trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração

O cálculo da potência dos trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração foi obtido através da Equação 24.

$$P_t = \dot{m}_a . c . \Delta T \quad (24)$$

Onde:

$P_t$  = potência retirada dos trocadores de calor do 1º e 2º estágios de cogeração [W]

$\dot{m}_a$  = vazão mássica média de água [kg/s]

$c$  = calor específico da água [ J/kg.°C]

$\Delta T$  = variação de temperatura entre a entrada e saída dos trocadores do 1º e 2º estágios de cogeração [°C]

#### 4.7.2.6 Potência equivalente de iluminação útil

O cálculo da potência equivalente de iluminação útil foi obtido com a Equação 25.

$$P_i = (f_1 . S) / \eta_t \quad (25)$$

Onde:

$P_i$  = potência equivalente de iluminação útil [W]

$f_i$  = é o fluxo de iluminação [lx ou lm/m<sup>2</sup>]

$S$  = é a área da superfície útil cilíndrica em torno da lâmpada [m<sup>2</sup>]

$\eta_t$  = é a eficiência luminosa média de lâmpadas no Brasil [ 32,31 lm/W]

#### **4.7.3 Processamento dos dados**

Para realização do processamento dos dados, bem como levantamento dos gráficos, foi utilizado o *software MS Excel®*, de modo a agilizar os cálculos, organizar os dados e automatizar o processo de execução, além de economia de tempo e minimização dos erros. A planilha de cálculos encontra-se no apêndice H.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

#### 5.2 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios (em vazio e com carga) realizado no Laboratório de Energia da UFRN, considerando os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

#### 5.3 Resultados obtidos e análises

##### 5.3.1 Vazão de gás e água de resfriamento

Os valores das vazões calculadas foram registrados na Tabela 2 abaixo.

**Tabela 2: Registro de vazões (condição de máxima potência)**

Vazão	kg/s	Condições
de GLP ( $\dot{m}_g$ )	1,687E-5	Regime permanente
de água ( $\dot{m}_a$ )	1,166E-2	

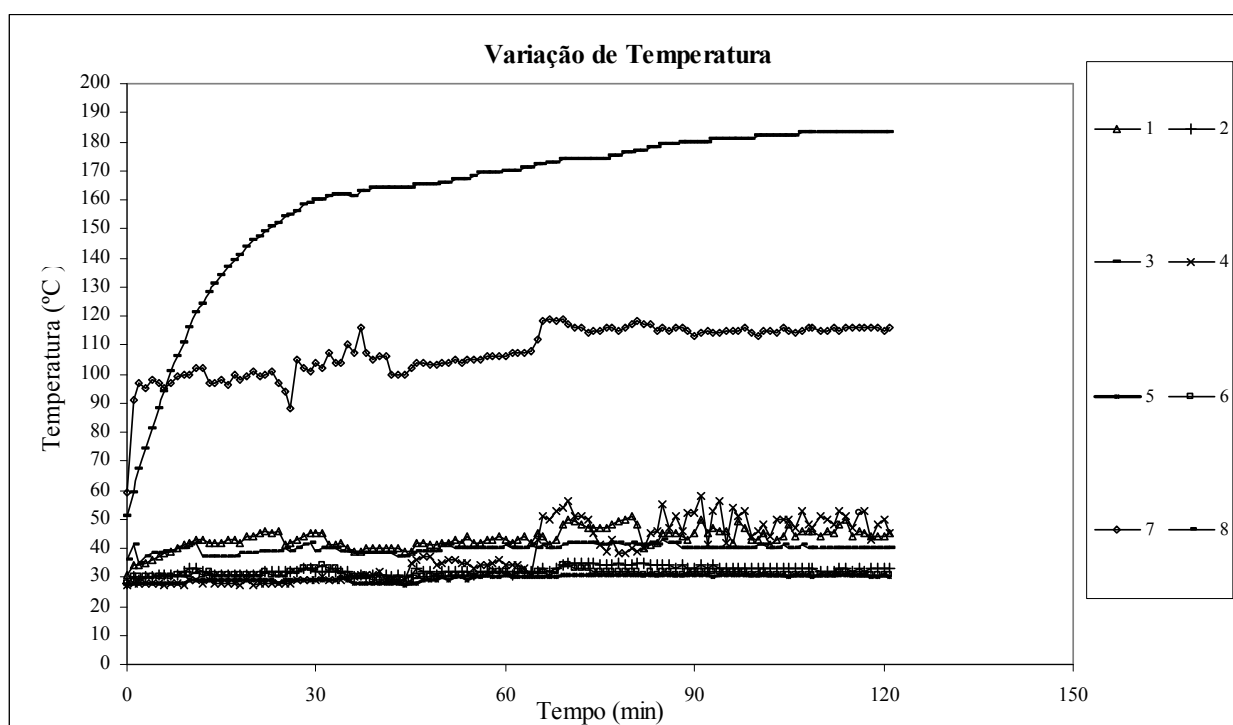
##### 5.3.2 Temperaturas medidas

A Tabela 3 identifica o termopar e respectivo ponto de medição. O gráfico da Figura 31 registra a temperatura x tempo, durante o processo de aquecimento da unidade até atingir a temperatura de regime permanente.

**Tabela 3: Pontos de temperatura da unidade**

Termopar	Ponto de medição
1	Temperatura da fonte fria
2	Temperatura da água de saída do trocador de calor da fonte fria
3	Temperatura da fonte quente
4	Temperatura do ar de entrada
5	Temperatura ambiente
6	Temperatura da água de entrada
7	Temperatura dos gases de saída
8	Temperatura da água de saída

A maior variação ocorre para a curva de temperatura da fonte quente (TFQ- ponto 3) atingindo o valor máximo de 183°C. A temperatura da fonte fria (TFF- ponto 1) apresentou uma variação pequena entre 30 e 50°C durante todo o tempo, demonstrando que o trocador de calor projetado para arrefecimento da face fria do módulo termoelétrico foi bastante satisfatório.

**Figura 31: Gráfico dos transientes de temperaturas da unidade GTE**

Observa-se pela dinâmica da temperatura da fonte quente (TFQ- ponto 3) que o sistema se aproxima de um sistema de 1ª ordem. A constante de tempo do sistema é aproximadamente de 10 min. O que significa que por volta de 30 min após a partida o sistema já atingiu a temperatura de regime permanente.

### 5.3.3 Intensidade luminosa e potência útil de iluminação

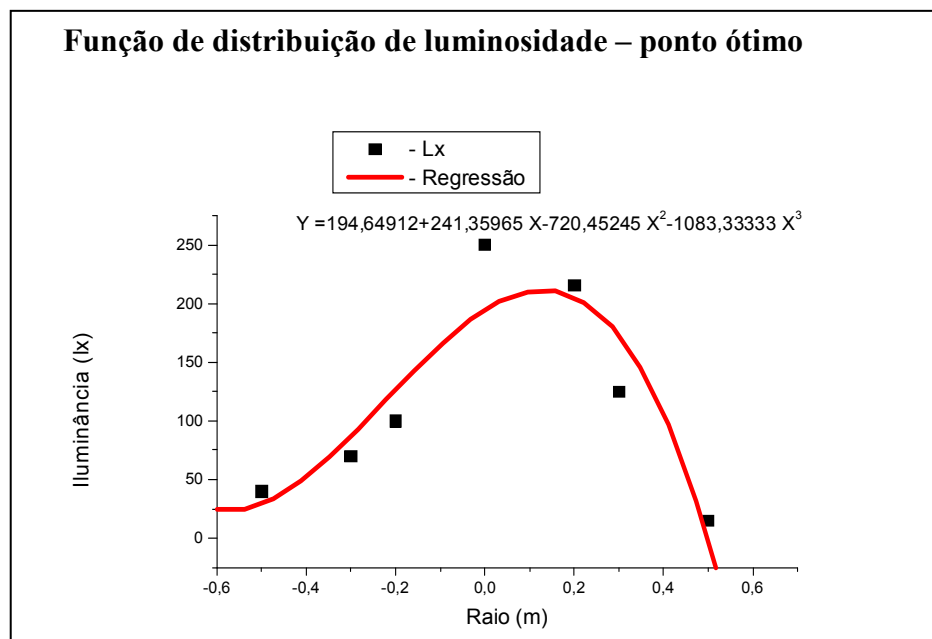
Os valores da Tabela 4 mostram o comportamento do perfil de iluminação produzida pelo lampião.

**Tabela 4: Iluminância (lx) em função da distância (m) do lampião da unidade GTE de tri-geração**

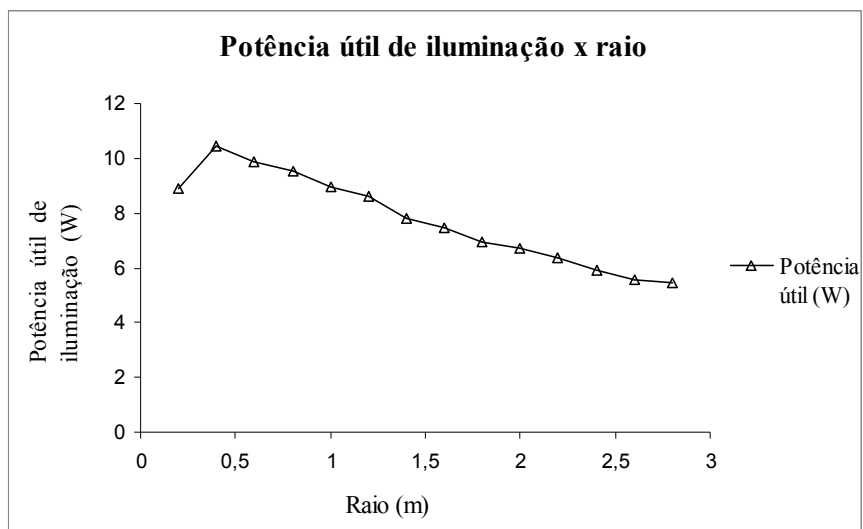
Distância horizontal	Iluminância (lx)							Potência equiv. de iluminação útil
	Iluminância (lx) Distância vertical (m)							
(m)	-0,50	-0,30	-0,20	0	0,20	0,30	0,50	(w)
0,2	Sombra	sombra	200	660	400	sombra	Sombra	8,90
0,4	40	70	100	250	215	125	15	10,47
0,6	35	57	70	137	115	95	20	9,89
0,8	30	40	50	85	80	75	38	9,52
1,0	30	31	46	60	53	50	36	8,93
1,2	30	31	35	45	40	38	32	8,60
1,4	24	24	28	35	31	28	26	7,81
1,6	21	22	24	29	24	23	22	7,48
1,8	17	17	19	24	21	20	18	6,95
2,0	15	16	17	20	18	17	16	6,74
2,2	14	14	15	17	15	14	14	6,37
2,4	12	12	12	14	13	13	12	5,92
2,6	10	11	11	12	11	11	10	5,57
2,8	9	10	10	11	10	10	9	5,45

O estudo das superfícies cilíndricas em torno do lampião, conforme ilustrado na Figura 32, (função de distribuição de luminosidade) indica que a maior potência obtida ocorre no

raio  $r = 0,4$  m em torno da lâmpada apresentando uma potência equivalente de iluminação útil  $P_i = 10,47$  W. A Figura 33 mostra a distribuição da potência útil de iluminação em função do raio, ressaltando-se o ponto ótimo.



**Figura 32: Função de distribuição de luminosidade**



**Figura 33: Potência equivalente de iluminação útil**

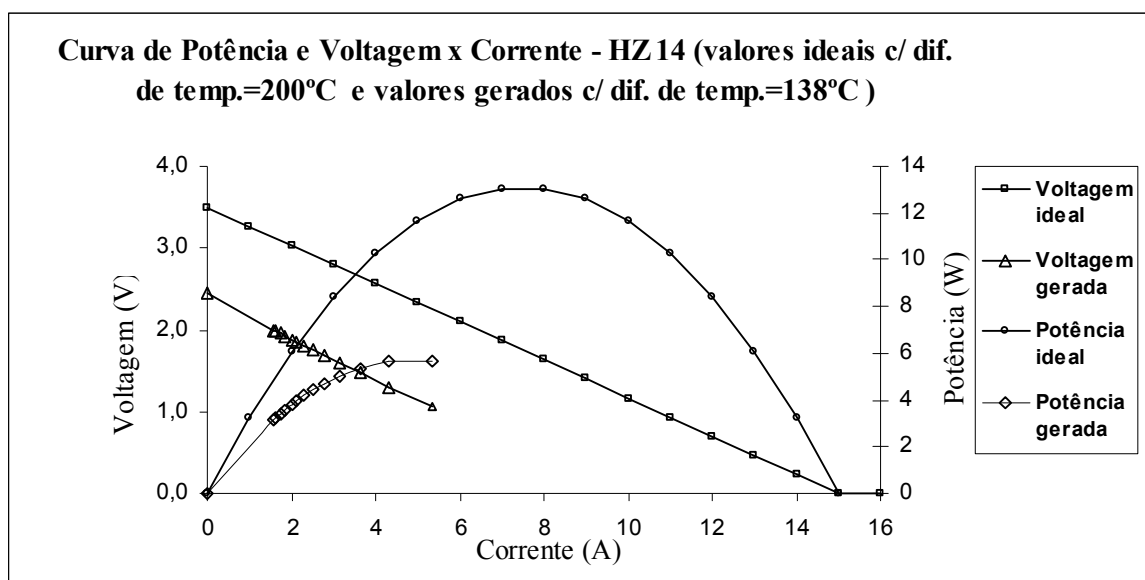
### 5.3.4 Comportamento do módulo termoeletrico

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com o módulo termoeletrico, operando nas seguintes condições: sem carga e com carga simulada com resistor de fio, após atingir o estado estacionário,  $\Delta T = 138^{\circ}\text{C}$ , entre a temperatura da fonte quente e da fonte fria.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de corrente e de voltagem medidos para a resistência de carga infinita (circuito aberto) e variando de 0,198 a 1,264  $\Omega$ . A potência foi calculada com base nos valores de carga máxima. O desempenho do módulo é apresentado no gráfico da Figura 34, na qual se compara o desempenho do módulo apresentado nas condições ideais com o desempenho nas condições de ensaio.

**Tabela 5: Valores de corrente, voltagem e potência para a carga associada**

Corrente (A)	Voltagem (V)	Resistência ( $\Omega$ )	Potência (W)
0	2,457	$\infty$	0
1,576	1,993	1,264	3,140
1,628	1,980	1,217	3,223
1,732	1,954	1,128	3,385
1,834	1,928	1,051	3,537
2,015	1,883	0,934	3,794
2,133	1,853	0,869	3,951
2,311	1,809	0,783	4,182
2,537	1,751	0,690	4,442
2,803	1,685	0,601	4,723
3,153	1,597	0,506	5,035
3,650	1,471	0,403	5,368
4,313	1,306	0,303	5,633
5,333	1,058	0,198	5,643



**Figura 34: Gráfico comparativo do comportamento do módulo nas condições ideais e de ensaio**  
 Fonte: LEAVITT, 2003. (Adaptado)

O Módulo termoeletrico apresentou um comportamento esperado de acordo com as informações do fabricante e com as condições de operação do sistema. Obteve-se uma potência máxima de 5,643 W, inferior a potência máxima prevista de 14 W em condições ideais de fixação, gradiente térmico, temperatura máxima e isolamento. Isso mostra que o sistema pode ser ainda muito otimizado.

A Tabela 6 ilustra o desempenho do módulo na condição de máxima potência.

**Tabela 6: Desempenho do módulo termoeletrico**

Principais resultados		
Tensão do módulo	(sem carga)	2,457 (V)
Tensão média do módulo	(carga de 0,198 $\Omega$ )*	1,058 (V)
Corrente média do módulo	(carga de 0,198 $\Omega$ )*	5,333 (A)
<b>Potência elétrica máxima do módulo (carga de 0,198<math>\Omega</math>)*</b>		<b>5,643 (W)</b>

\* Condição de máxima potência



### 5.3.5 Comportamento da unidade de tri-geração

Embora, a eficiência de iluminação seja baixa e a geração elétrica tenha ficado abaixo da esperada, a eficiência global da unidade de tri-geração foi elevada devido ao bom aproveitamento da cogeração através do sistema de trocadores de calor projetados. A Tabela 7 ilustra a eficiência individual e global da unidade.

**Tabela 7: Desempenho do protótipo de unidade com tri-geração de energia**

Componente	Potências (W)	Eficiência (%)
Modulo HZ-14 ( $P_m =$ )	5,64	0,73
Lâmpião ( $P_i =$ )	10,47	1,35
Cogerador ( $P_t =$ )	439,25	56,55
Perdas ( $P =$ )	321,39	41,37
$\Sigma$ Total=	776,75	100,00
$\Sigma$ Unidade com tri-geração	455,36	58,62
<b>Combustível</b> $P_c =$	776,75	

## CAPÍTULO 6

### 6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma contribuição para utilização racional da energia distribuída, focando um estudo de caso voltado para aplicações remotas. Entretanto, procura demonstrar o impacto que mesmo a mais simples aplicação pode exercer sobre o meio ambiente no que diz respeito ao aproveitamento da energia.

O protótipo desenvolvido, como também, a metodologia de ensaio adotada atenderam satisfatoriamente aos objetivos propostos, possibilitando a obtenção de resultados conclusivos a cerca do desempenho do experimento:

A) O lampião a gás convencional apresentou um rendimento inferior a 1,5%, demonstrando a sua baixa eficiência de conversão de energia química em energia luminosa.

B) O sistema apresenta-se como uma boa alternativa para tri-geração em áreas remotas produzindo um total de energia útil de 455,36 W com eficiência global de 58,62%. Principalmente quando se considera o rendimento térmico do sistema, com base no motor de Carnot, onde a eficiência do sistema atingiria no máximo 33,02%.

C) O módulo Termoelétrico HZ-14 embora tenha apresentado potência de 40,29% daquela ideal (14 W) indicada pelo fabricante, mesmo assim é suficiente para carregar uma bateria de 12 V com capacidade de 50 Ah num período de 106 horas ou alimentar uma lâmpada PL de 9 W por um período de 15 h em um dia.

D) O sistema de cogeração permite o fornecimento de 42 litros/hora de água, produzindo um gradiente de temperatura de 10°C, o que para aplicações remotas constitui-se num aproveitamento precioso.

E) As curvas de temperatura demonstram que o sistema tende ao regime estacionário após 30 minutos de funcionamento.

Propõem-se como sugestões para trabalhos futuros o seguinte:

A) Melhoria do *design* dos trocadores de calor, isolamento térmico, fixação do módulo, aplicadas ao protótipo conduzirão a um aumento de eficiência.

B) Testar a utilização de módulos HZ-2 (2,5 W) associados em série que poderá trazer melhor aproveitamento da área das fontes quente e fria, aumento da voltagem gerada, e conseqüentemente um ganho de eficiência do sistema.

C) Para transformação do protótipo em um produto comercial, faz-se necessária análise crítica para melhoria e otimização do *design*, isolamento térmico, e proteção ao usuário.

## REFERÊNCIAS CITADAS

ARAÚJO, Renato A. F. de. **Estudo do aproveitamento térmico dos gases de exaustão de um moto-gerador elétrico:** cogeração e termoeletricidade. 2005. f. Dissertação (Mestrado em Eng<sup>a</sup> Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), [Natal], 2005.

ASSAF, Leonardo O.; PEREIRA, Fernando O. Ruttkay. **Perspectivas de la eficiencia energética en la iluminación:** desafíos para el desarrollo. [S.l.]: ENCAC-COTEDI, 2003.

BASS, John C.; FARLEY, Robert L. **Examples of power from waste heat for gas fields.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 16., 1997. Dresden Germany: [s.n.], 1997.

BEGA, Egidio Alberto (Org). **Instrumentação industrial.** Rio de Janeiro: Interciência; IBP, 2006.

COLD POWER. Teg Power Products. **Inovações para o amanhã.** [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.epower4.com/cpbrochurebr-pg.htm>>. Acesso em: 2 jan. 2005.

DELMEE, Gerard J. **Manual de medição de vazão.** 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 346 p.

ELECTUS DISTRIBUTION. **DC-DC Converters:** a prime. [S.l.], 2001. Disponível em: <[http://www.electusdistribution.com.au/images\\_uploaded/dcdconv.pdf](http://www.electusdistribution.com.au/images_uploaded/dcdconv.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2006.

GLOBAL THERMOELECTRIC. **Customer success history:** grant county ESD. [S.l.], 2006.

HI-Z TECHNOLOGY. **Thermoelectric truck engine generator.** [S.l.], 1999a. Disponível em: <<http://www.hi-z.com/websit07.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2005.

HI-Z TECHNOLOGY. **Generator for a wood stove.** [S.l.], 1999b. Disponível em: <<http://www.hi-z.com/websit13.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2005.

HI-Z TECHNOLOGY. **Thermoelectric-powered water heater.** [S.l.], 2002. Disponível em: <<http://www.hi-z.com/websit09.htm>>. Acesso em: 16 jun. 2005.

INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 698 p.

KILLANDER, Anders J. **Generating electricity for families in northern Sweden**. [S.l.: s.n.], 1997.

LEAVITT, Frederick A. et al. **Use, application and testing of hi-z thermoelectric modules**: the hz-14 is used as an example: the other modules should be evaluated in a similar way. San Diego: Hi-Z Technology, 2003. Disponível em: <<http://hi-z.com/manual.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2005.

MELLO, Luiz F. P. de. **Projetos de fonte chaveada**. 2. ed. São Paulo: Érica, 1988. 292 p.

NOVUS. **Manual de Instruções V2.0X**: registrador eletrônico: registrador field logger. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=526464&SecaoID=948825>>. Acesso em: 8 nov. 2006.

ONO, K.; SUZUKI, R. O. **Thermoelectric power generation**: converting low-grade heat into electricity. [S.l.]: JOM, 1998.

POMILIO, José. A. **Circuitos integrados dedicados**. In: Fonte Chaveada. Campinas. [s.n.], 2005. cap. 11. Apostila.

SANTANILLA, C. E. C. **Generación y aprovechamiento de energía termoeléctrica**. Thesis: Puerto Rico University, 2004. 61 p.

SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS (SBRT); INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ (TECPAR). **Resposta técnica**: composição e poder calorífico do GLP. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/upload/sbrt3745.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2006.

THERMO-ELETRIC GENERATORS. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://www.dself.dsl.pipex.com/MUSEUM/POWER/thermoelectric/thermoelectric.htm>> . Acesso em: 5 dez. 2006.

## REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ALUMINUM OXIDE, 2002. Disponível em:

<<http://www accuratus.com/alumox.html>>. Acesso em 12 de outubro de 2006.

APLICAÇÕES típicas da cogeração. Disponível em:

<<http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/0/BAD638D8FA51F04303256DAD004CDAEE?OpenDocument&SEnergia>>. Acesso em: 5 mar. 2006.

BALANÇO Energético Nacional (BEN) 2006: estudos preliminares: ano-base 2005. [S.l.], 2006.

BOREALIS. **Power chips plc:** power chipstm: technical overview. Disponível em:

<<http://www.powerchips.gi/technology/powerchipstech09Jan03.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2005.

BREDA, Tadeu. **Apesar da adesão russa, Protocolo de Kyoto só decola com os Estados**

**Unidos.** [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/bols/extras/2004/extra078.htm>>. Acesso em: 2 dez. 2006.

COGEN. **An introduction to micro-cogeneration:** cogen europe briefing 8. [S.l.], 1999. 7 p.

CONSISTEC. **Termopar tipo “T”.** Disponível em: <<http://www.consistec.com.br/>>. Acesso em: 5 jan. 2006.

COSTA, Ennio Cruz da,. **Refrigeração.** São Paulo. 3ª ed. Edgrad Blucher.1982.

DREYER, Hans Peter. **The peltier device:** a multi purpose engine, physics kantonsschule wattwil. wattwil”. Switzerland, [200-]. Disponível em:

<[http://www.tufts.edu/as/wright\\_center/lessons/pdf/docs/activities/peltier\\_wheel.pdf](http://www.tufts.edu/as/wright_center/lessons/pdf/docs/activities/peltier_wheel.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (INEE). **Conservação de energia e emissões de gases do efeito estufa no Brasil.** [S.l.], 1998, 39 p.

KILGROW, S.; GEIRSSON, A.; SIGFUSSON, T. **Harnessing of low temperature geothermal and waste heat using power chips® in varmaraf heat exchagers.** Reykjavik: International Geothermal Conference, 2003.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. (Orgs.). **Geração termelétrica:** planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 2. 1269 p.

METÁLICA. **Lã de rocha**. Disponível em:

<[http://www.metalica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=541](http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=541)>. Acesso em: 2 jan. 2006.

PROGRAMA Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Disponível em:

<<http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?TeamID={B3AA0142-B1FE-4AAD-AB15-E8426471B739}>>. Acesso em: 3 dez. 2006.

SCHAEVITZ, Samuel B. et al. **A combustion-based mems thermoelectric power generator**.

Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; Microsystems Technology Laboratories, [200-]. Disponível em: <<http://jensengroup.mit.edu/publications/SamTE.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2007.

SCHROEDER, Jon M. **A new electric generator for powering remote facilities**. [S.l.], 2000.

Disponível em:

<<http://www.bandwidthmarket.com/resources/speeches/apptech/schroedr/schroedr.doc>>. Acesso em: 6 dez. 2004.

SILVA, Ennio Peres. **Fontes renováveis de energia para o desenvolvimento sustentável**. [S.l.],

2004. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2004/12/15.shtml>>. Acesso em: 11 nov. 2006.

SOUZA, Monique Lopes Valente. **Utilização de termogeradores como fonte de energia alternativa**. Disponível em:

<[http://www.gasnet.com.br/novidades/novidades\\_view2.asp?cod=422](http://www.gasnet.com.br/novidades/novidades_view2.asp?cod=422)>. Acesso em: 6 mar. 2006.

UNIVERSIDADE SÃO PAULO. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

(ESALQ/USP). **Pólo nacional de biocombustíveis**. São Paulo, 2005. Disponível em:

<<http://www.polobio.esalq.usp.br/biocombustiveis.html>>. Acesso em: 2 dez. 2006.

VOLLSTEDT, Ann-Marie. **Thermoelectric power generation and refrigeration systems**. [S.l.: s.n.], 2001. 11 p.

WEINBERG, F. J. et al. **On thermoelectric power conversion from heat re-circulating**

**combustion systems**. Los Angeles: University of Southern California, [200-]. Disponível em:

<[http://carambola.usc.edu/publications/Weinberg\\_TE\\_ISC29.pdf](http://carambola.usc.edu/publications/Weinberg_TE_ISC29.pdf)>. Acesso em: 4 jul. 2006.

WYLEN, Gordon Van. et al. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 589 p.

## Apêndice A – Aplicações de módulos termoeletricos

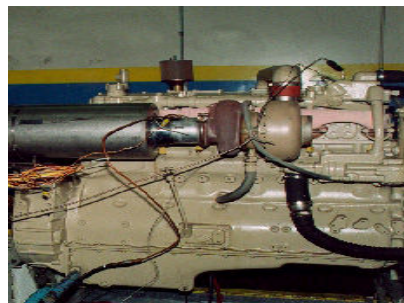
### 1.1 Gerador termoeletrico de 1 kW em motor de caminhão

A empresa norte americana *Hi-Z Technology, Inc.* construiu um gerador de 1 kW (*HI-Z TECHNOLOGY*, 1999a), para aproveitar o calor residual dos gases de descarga do motor de um caminhão diesel classe 8. Este gerador termoeletrico pode ser empregado como substituto do alternador do caminhão. A potência para o eixo aumenta 3 a 5 cavalos de força, aumentando a eficiência do combustível e reduzindo as emissões.

O gerador de 1 kW no caminhão *truck*, marca *Mack*, da frota da *Air Products* rodando fora de *Chandler, Arizona* (O gerador parece o tubo de descarga vertical, que ele substituiu). Veja na Figura 1 o gerador instalado no caminhão *Mack* e na Figura 2 o gerador instalado no motor estacionário *Cummins* NTC 275.



**Figura 1: Gerador na descarga de caminhão *Mack***  
Fonte: *HI-Z TECHNOLOGY*, 1999a.



**Figura 2: Gerador de 1 kW em um motor *Cummins* NTC 275 de 4 litros, na saída do turbocompressor, na célula de teste**  
Fonte: *HI-Z TECHNOLOGY*, 1999a.

Setenta e dois módulos HZ-14 geram potência elétrica a partir do calor da exaustão. O gerador está localizado na saída de gases após o turbocompressor. O calor do lado frio do gerador termoeletrico é removido por circulação de água para o radiador.

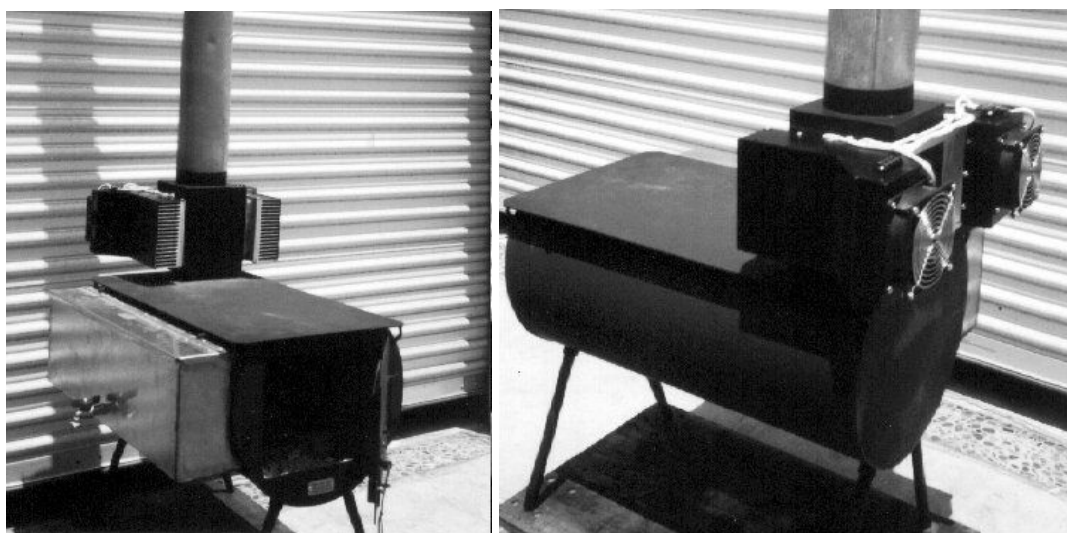


O gerador foi extensivamente testado em motores estacionários e agora começaram os testes de estrada. Sob condições de teste a unidade gerou mais que 1 kW.

O trabalho foi desenvolvido pelo Departamento de Energia Americano e pela Comissão de Energia da Califórnia.

## 1.2 Gerador termoeletrico para fogão a lenha

Um gerador termoeletrico para fogão a lenha (*HI-Z TECHNOLOGY*, 2002), foi desenvolvido na *Hi-Z Technology, Inc.* O protótipo mostrado na Figura 3, é colocado na saída de gases do fogão, com diâmetro de 5". O gerador contém 2 módulos HZ-14 e fornece 20 W a uma rede de 12 a 14 Vcc.



**Figura 3: Gerador termoeletrico para forno de lenha**  
**Fonte: HI-Z TECHNOLOGY, 2002.**

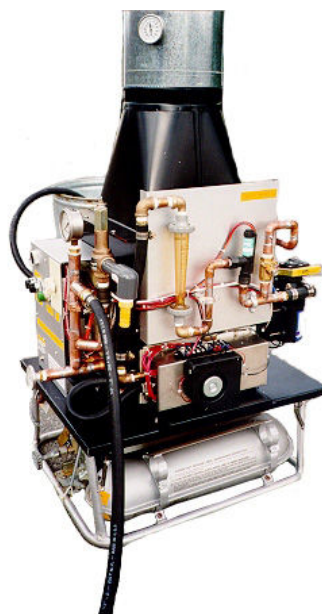
O gerador inclui dois ventiladores cc com motor sem escovas, para circulação do ar frio sobre os dissipadores de calor. Esta circulação de ar deve aumentar o nível de conforto da casa e resulta na diminuição do consumo de combustível.

A tensão de saída dos módulos é convertida de 12 a 14 Vcc por um conversor cc-cc (não mostrado). A potência produzida pelo gerador pode ser usada diretamente ou pode ser usada para recarregar uma bateria para uso posterior no aumento do consumo.

O forno mostrado é comercialmente disponível no formato de forno cilíndrico.

### 1.3 Aquecedor de água alimentado por termoeletricidade

Fabricado para o Exército Americano, *Soldier Systems Command, Natick, Mass.* Pela *Yankee Scientific, Inc. (HI-Z TECHNOLOGY, 1999b)*, entrega até 2 GPM (galões por minuto  $\approx$  454 l/h) de água na temperatura máxima de saída de 160°F ( $\approx$ 71°C). O protótipo do aquecedor está ilustrado na Figura 4.



**Figura 4: Aquecedor de água alimentado por termoeletricidade**  
**Fonte: HI-Z TECHNOLOGY, 1999b.**

A fonte de potência para aquecer a água é um queimador padrão do exército usando gasolina (conhecido como queimador M2). Água é bombeada através de uma série de tubos aletados localizados sobre o queimador. A alimentação para a bomba é fornecida pelo gerador termoeletrico usando 3 módulos HZ-20. Os módulos são refrigerados a água pelo mesmo fluxo

de água que subsequenteiramente passa através dos tubos trocadores de calor. Desta forma, nesta aplicação, 100% do calor que entra no gerador termoelétrico é destinado ao uso eficiente.

A unidade está sendo avaliada pelo Exército para propósito de higiene no campo, incluindo cozinha (cozimento e limpeza), lavanderia, banhos, descontaminação e manutenção de equipamentos.

O aquecedor de água na Figura 4, é um protótipo de engenharia. Assim inclui instrumentos de leitura que serão removidos no projeto final.

## **1.4 Outros fabricantes de módulos termoelétricos**

### **1.4.1 *Varmaraf***

A *Varmaraf*, empresa Islandense, está utilizando os geradores termoelétricos, em regiões onde há fonte de calor geotérmica e temperaturas ambientes muito baixas inclusive com neve.

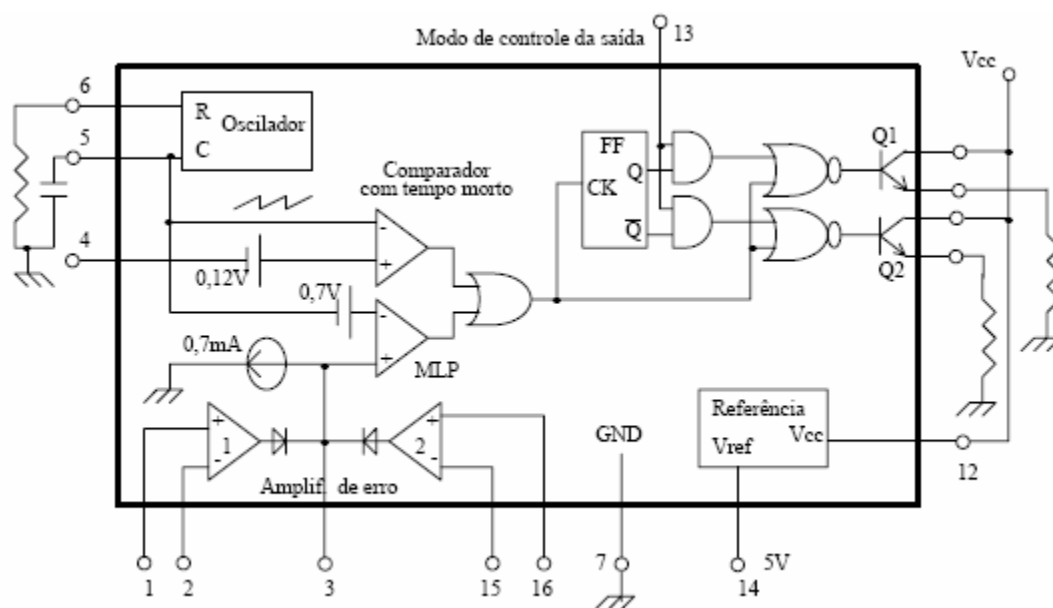
### **1.4.2 *Cold Power Company***

A *Cold Power Company*, empresa texana, desenvolveu um gerador elétrico baseado no funcionamento termoelétrico, com capacidade de alimentar uma pequena casa americana de 5 kW, (*COLD POWER*, 2004).

## Apêndice B – Controlador PWM CI TL494

### 2.1 Funcionamento do CI TL494

A Figura 5 mostra o diagrama interno do CI TL494.



**Figura 5: Diagrama interno do CI TL 494**  
**Fonte: POMILIO, 2005.**

O TL494 possui 2 saídas, com deslocamento de 180° elétricos, de modo a ser possível o acionamento de uma topologia tipo *push pull*. Caso ambas saídas sejam conectadas em paralelo, tem-se um acionamento para um conversor de uma única chave.

A onda dente de serra utilizada para gerar o sinal de Modulação de Largura de Pulso (MLP) vem de um oscilador interno cuja frequência é determinada por um par RC conectado externamente.

O sinal MLP é obtido pela comparação da tensão sobre o capacitor (dente de serra) com o sinal proveniente de um dos sinais de controle. A cada subida do sinal MLP altera-se o estado do *flip-flop* (FF), de modo a selecionar uma das saídas a cada período do oscilador. Uma

operação lógica entre o sinal MLP e as saídas do FF, é enviada às saídas. Além disso, um sinal de controle de modo de saída (pino 13) faz com que, quando em nível alto, as saídas sejam adequadas a um conversor *push pull*. Quando em nível baixo, ambas as saídas variam simultaneamente, uma vez que os sinais do FF ficam inibidos.

O sinal MLP depende ainda de um comparador que determina o tempo morto, ou seja, uma largura de pulso máxima em cada período, o que garante um intervalo de tempo em que ambas as saídas estão desligadas. Em uma topologia *push pull* ou em ponte isto impede a condução simultânea de ambas as chaves, o que colocaria em curto-circuito a fonte. Uma tensão interna de 120 mV associada à entrada de tempo morto garante um valor mínimo de cerca de 4%, limitando assim o ciclo de trabalho máximo a 96%. Um potencial mais elevado conectado a este pino (4), aumenta o tempo morto, numa faixa de variação de 0 a 3,3 V (tempo morto de 100%).

A regulação da tensão de saída é usualmente feita por meio dos amplificadores de erro, com o sinal de realimentação disponível no pino 3. Os 2 amplificadores de erro podem ser usados para fazer a realimentação de tensão e limitar a corrente pelo circuito. As saídas dos amplificadores estão conectadas de modo a que o sinal na entrada do comparador MLP (pino 3) seja determinado pelo amplificador que apresentar a tensão mais elevada, o que leva à menor largura de pulso nas saídas. A tensão neste pino encontra-se entre 0,5 e 3,5 V. O CI dispõe de uma fonte de referência interna de 5 V, (POMILIO, 2005).

## **Apêndice C – Legislação a respeito de cogeração no Brasil**

A legislação brasileira sobre cogeração vem sendo esboçada desde 1981, com o Decreto 1872 de 21/05/1981, o qual dispõe sobre a aquisição, pelas concessionárias, de energia elétrica excedente gerada por autoprodutores. Essa normalização teve continuidade com a portaria nº 283 de 1985, a qual criou a chamada Demanda Suplementar de Reserva (DSR), também chamada de backup, quando o autoprodutor precisa comprar energia da concessionária por motivo da sua geração própria ter sido interrompida ou reduzida por algum motivo. Porém o contrato feito para atender a DSR traz tarifas altas, pois cobra a energia propriamente consumida mais a tarifa mensal de emergência, mesmo que a DSR não tenha sido utilizada. Vale também para esse tipo de contrato a tarifa de ultrapassagem, ou seja, quando a demanda medida e integralizada de um determinado período for superior a soma das demandas contratada e suplementar de reserva.

Quanto aos empreendimentos privados de cogeração, com a promulgação da portaria do departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE) nº 187 de 1988, eles são enquadrados em três faixas de potência: uma primeira faixa que vai até 500 kW, a seguinte de 500 kW a 10 MW e a última que é para empreendimentos acima de 10 MW. Quanto maior a potência alcançada, maiores as exigências que os geradores têm que atender, como a apresentação do projeto básico e dos estudos de viabilidade técnica e ambiental. O texto dessa Portaria também indica o caráter do empreendimento, ou seja, se o produtor é independente ou autoprodutor. Outro texto importante para a cogeração foi a Portaria do DNAEE nº 246 de 23/12/1998, na qual foi introduzida a figura da cogeração, e que regulamenta a aquisição de energia elétrica excedente de autoprodutor pelas concessionárias.

Com objetivo de implementar políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos no País, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução nº 0212, de 20 de Janeiro de 2000. Esta resolução estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais cogeneradoras de energia a participarem das políticas de incentivo a cogeração.

A portaria nº 5513 do Ministério de Minas e Energia (MME), de 06 de Dezembro de 2000, estabelece que as usinas termelétricas de cogeração, que estejam qualificadas pela ANEEL, que entrarem em operação até o dia 31 de Dezembro de 2003, farão parte do Programa Prioritário de Termelétricidade 2000-2003.

Essas usinas qualificadas pela ANEEL e que fazem uso do gás natural como combustível terão seu suprimento de gás garantido pela Petrobrás pelo prazo de até vinte anos. Também está garantida a aplicação do valor normativo à distribuidora de energia elétrica por um período de vinte anos.

A empresa que instalar uma planta de cogeração, de acordo com a portaria nº 551, terá o apoio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para o acesso ao Programa de Apoio Financeiro a Investimentos Prioritários no Setor Elétrico, com o objetivo de construir a planta e conexão à rede elétrica.

De acordo com a resolução nº 1704 da ANEEL, de 04 de Maio de 2001, os cogeneradores, autoprodutores e centrais geradoras de emergência estão sujeitos a condições especiais para comercialização temporária de energia elétrica proveniente de excedentes.

Uma das condições é solicitar à ANEEL um requerimento de autorização para fins de comercialização temporária de energia elétrica. Em um dos campos deste requerimento o empresário deverá indicar a potência instalada e potência disponibilizada para fins de comercialização temporária.

A resolução nº 170 permite ao produtor comercializar com as concessionárias e permissionárias de distribuição ou diretamente com o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) por preços livremente ajustados. Os contratos de compra de energia elétrica deverão ser registrados na ANEEL em um período de quinze dias pela empresa compradora.

## Apêndice D – Trocador de calor do 1º estágio de cogeração

A figura 6 ilustra o diagrama de fluxo de calor do cabeçote até o trocador de calor do 1º estágio de cogeração.

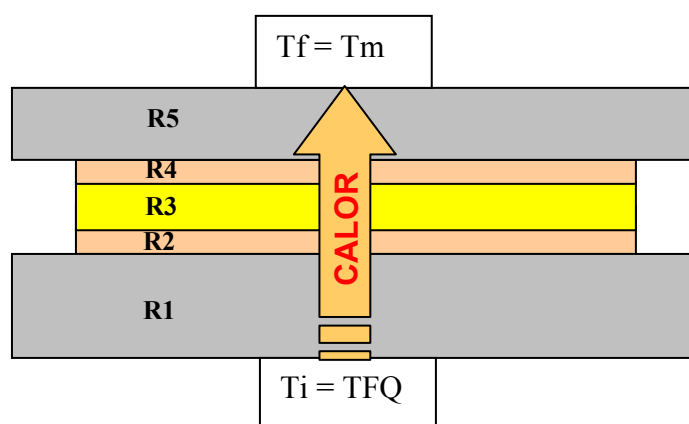


Figura 6: Diagrama de fluxo de calor para o trocador de calor do 1º estágio de cogeração

### Descrição das resistências térmicas:

R1 = Cabeçote de alumínio

- espessura de 0,020 m
- condutividade térmica do alumínio,  $\kappa_1 = 237 \text{ W/m.K}$

R2 = Almofada de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- espessura  $2,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
- condutividade térmica da alumina,  $\kappa_2 = 25 \text{ W/m.K}$

R3 = Módulo termoeletrico HZ 14

- espessura de  $5,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- condutividade térmica do módulo  $\kappa_3 = 2,4 \text{ W/m.K}$

R4 = Almofada de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- espessura  $2,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
- condutividade térmica da alumina,  $\kappa_2 = 25 \text{ W/m.K}$



R5 = Trocador 1º estágio (parede)

- espessura de 0,015 m

- condutividade térmica do alumínio,  $K_1 = 237 \text{ W/m.K}$

A1, A2, A3, A4 e A5 = Área de troca igual a área do módulo termoeletrico =  $3,93129 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

$T_i$  = Temp. da Fonte Quente =  $183^\circ\text{C}$

Considerando a média logarítmica das temperaturas igual a média aritmética.

$T_f = T_m$  = temperatura média entre a entrada e saída do trocador de calor =  $32^\circ\text{C}$

Aplicando a equação 1, tem-se:

$$Q = \frac{T_i - T_f}{\frac{L_1}{K_1 \cdot A_1} + \frac{L_2}{K_2 \cdot A_2} + \frac{L_3}{K_3 \cdot A_3} + \frac{L_4}{K_4 \cdot A_4} + \frac{L_5}{K_5 \cdot A_5}} \quad (1)$$

Encontra-se  **$Q = 259,83 \text{ W}$**

### **Calor absorvido pela água no trocador de calor do 1º estágio:**

Considerando:

Temperatura da água na entrada do trocador de entrada =  $31^\circ\text{C}$

Temperatura da água na saída do trocador =  $33^\circ\text{C}$

Vazão em massa da água =  $1,166 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$

Calor específico da água =  $4.185 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$

Aplicando a equação 2, tem-se:

$$Q_{ab} = \dot{m}_{ag} \cdot c_{Pag} \cdot \Delta T \quad (2)$$

**$Q_{ab1} = 97,59 \text{ W}$**

Observa-se que o calor absorvido pela água é inferior ao calor disponível. Isto se deveu a não realização de isolamento térmico na parte superior do trocador de calor, medida tomada por prudência a fim de proteger o módulo termoeletrico da alta temperatura.

## Apêndice E – Trocador de calor do 2º estágio de cogeração

A figura 7 ilustra o fluxo de calor para o trocador do 2º estágio de cogeração, do cabeçote (saída de gases quentes) até a descarga dos gases na atmosfera.

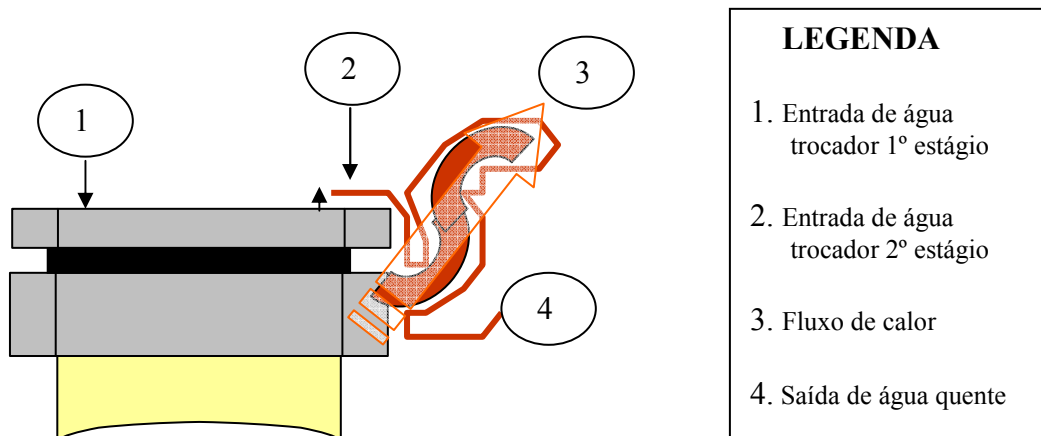


Figura 7: Diagrama de fluxo de calor para o trocador de calor do 2º estágio de cogeração

Considerações:

Para efeito de simplificação dos cálculos:

serão desconsiderados os efeitos da convecção e irradiação;

temperatura dos gases na entrada do trocador do 2º estágio igual a temperatura da Fonte Quente;

### Calor absorvido pela água no trocador do 2º estágio de cogeração

Considerando:

Temperatura da água de entrada no trocador do 2º estágio = 33°C

Temperatura da água de saída no trocador do 2º estágio = 40°C

Vazão em massa da água = 1,166E-2 kg/s

Calor específico da água = 4185 J/kg°C

Aplicando a equação 2, tem-se:

$$Q_{ab2} = 341,58 \text{ W}$$

### **Cálculo do coeficiente global de troca do trocador do 2º estágio:**

Considerando o sistema conservativo e que o isolamento térmico aplicado ao 2º trocador de calor é de alta eficiência.

Tem-se:

O calor absorvido pela água é igual ao calor produzido pelos gases quente:

$$Q_{ab2} = Q_g$$

Assim, aplicando-se a equação 3, temos:

$$\dot{m}_{ag}.c_{pag}.\Delta T_1 = U.A.\Delta T_g \quad (3)$$

Portanto o coeficiente global de troca será:

$$U = \dot{m}_{ag}.c_{pag}.\Delta T_1 / A.\Delta T_g$$

Considerando  $Q_{ab2} = 341,58 \text{ W}$

Temperatura dos gases de entrada (TFQ) = 183°C

Temperatura dos gases de saída = 116 °C

Área de troca aproximada = 0,0113 m<sup>2</sup>

Encontra-se  **$U = 451,16 \text{ W/m}^2.\text{K}$**

## Apêndice F – Detalhes do circuito conversor cc-cc

### 6.1 Formas de onda apresentada pelo conversor

6.1.1 Nos pinos 9 e 10 (saída de pulso para chaveamento dos transistores TR1 e TR2).

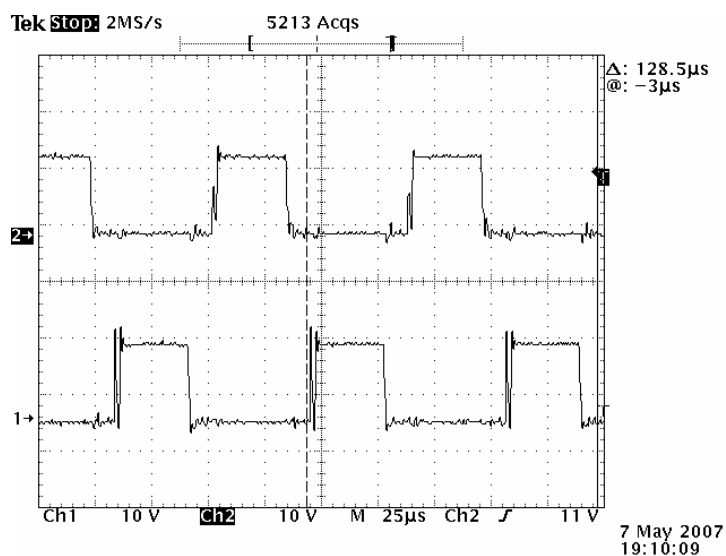


Figura 10: Saída do conversor com carga alta

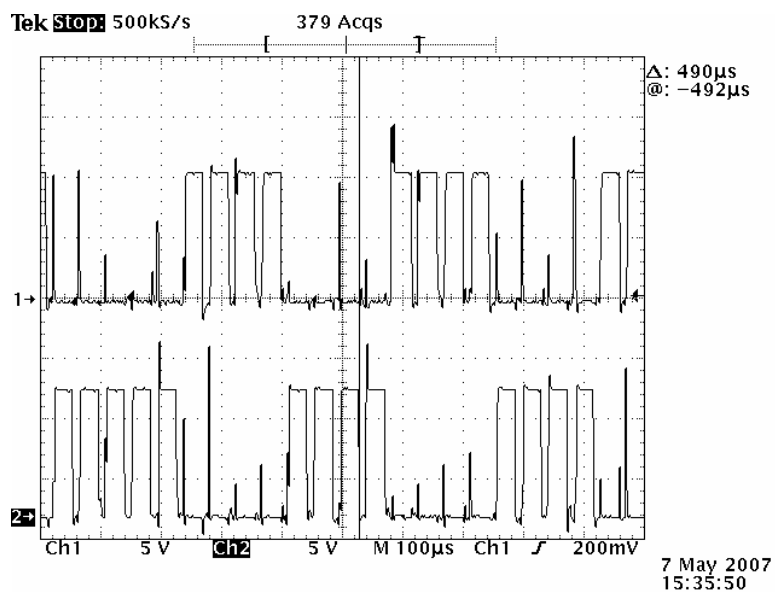


Figura 11: Saída do conversor sem carga

### 6.1.2 No secundário do transformador T1.

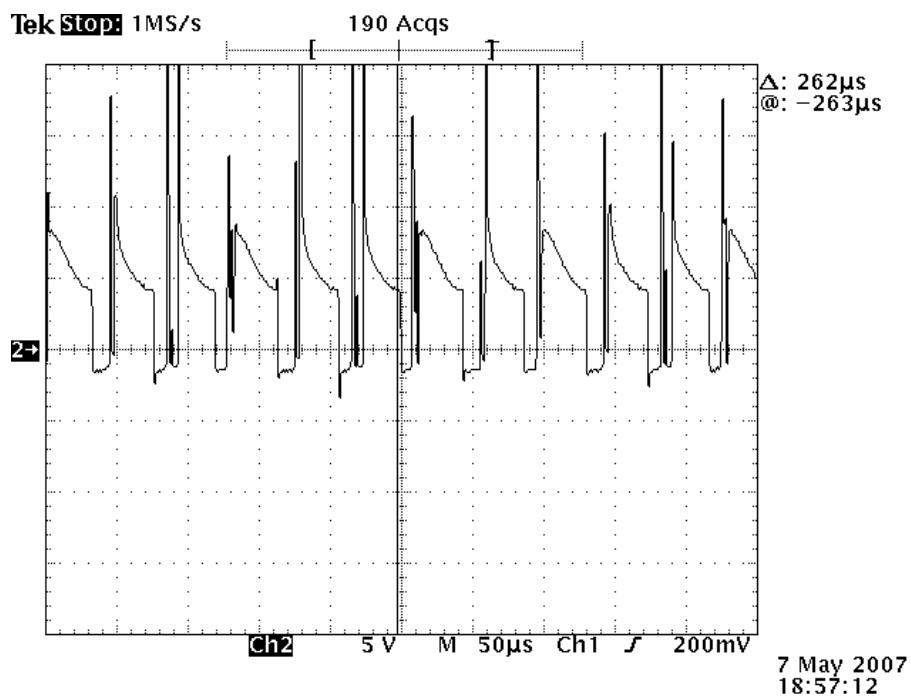


Figura 12: Forma de onda no secundário do transformador T1

### 6.1.3 Nos gates dos transistores TR1 e TR2.

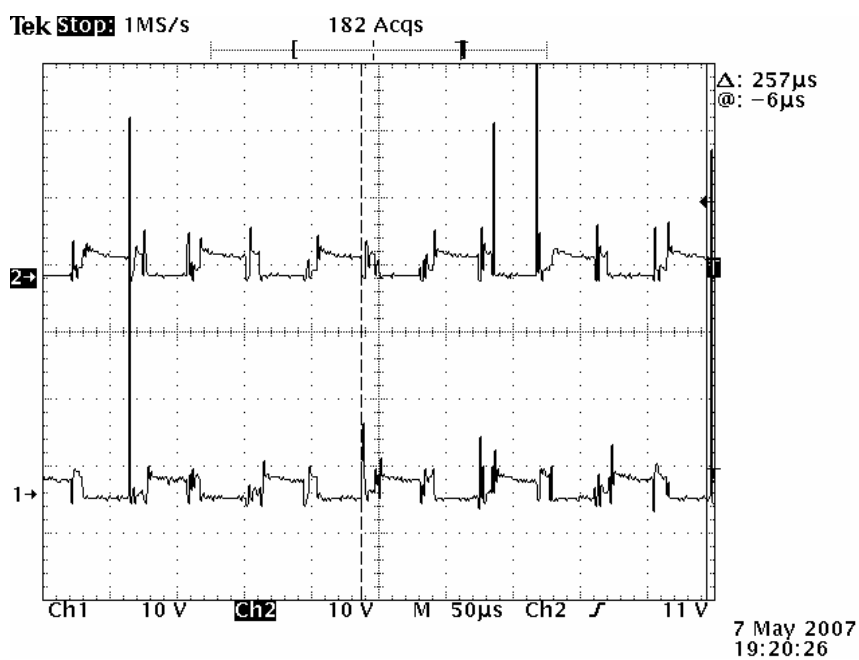


Figura 13: Nos gates dos transistores TR1 e TR2

## Apêndice G – Dados pesquisados

### 7.1 Dados Pesquisados

Calor específico da água (INCROPERA e WITT, 2003)

$$c = 4.185,00 \text{ [J/kg.}^{\circ}\text{C]}$$

Poder calorífico Inferior (PCI) do GLP, (SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS, 2006).

$$PCI = 46.042,24\text{E}+3 \text{ [J/kg]}$$

Densidade da água (INCROPERA e WITT, 2003)

$$\rho_{H_2O} = 1\,000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Eficiência luminosa média de lâmpadas no Brasil (ASSAF e PEREIRA, 2003)

$$\eta_l = 32,31 \text{ [lm/W]}$$

Condutividade térmica do alumínio (INCROPERA e WITT, 2003)

$$K_1 = 237 \text{ W/m.K}$$

Condutividade térmica da almofada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ALUMINUM OXIDE, 2002)

$$K_2 = 25 \text{ W/m.K}$$

Condutividade térmica do módulo termoeletrico HZ 14 ( LEAVITT, 2003)

$$K_3 = 2,4 \text{ W/m.K}$$

## Apêndice H – Planilha de cálculo da unidade GTE

PLANILHA DE CÁLCULO	
UNIDADE GTE DE TRI-GERAÇÃO	
Responsável	Ildefonso Martins dos Santos
Data	11.11.2006
Início (h)	18:35
Término (h)	20:36
VARIÁVEIS MEDIDAS: ( em regime)	
Temperatura da fonte fria (°C)	45
Temp. água de saída do trocador de calor do 1º estágio (°C)	33
Temperatura da fonte quente (°C)	183
Temperatura do ar de entrada (°C)	45
Temperatura ambiente (°C)	30
Temperatura da água de entrada (°C)	31
Temperatura dos gases de saída (°C)	116
Temperatura da água de saída (°C)	40
Volume de água de refrigeração (ml)	1400
Massa de gás (g)	20,25
TEMPO	
Escoamento da água de refrigeração (min)	2
Escoamento do gás (min)	20
GRANDEZAS ELÉTRICAS	
Tensão gerada no módulo (V)	1,058
Corrente do módulo (A)	5,333
VARIÁVEIS PESQUISADAS	
Calor específico da água (J / kg.°C)	4185
PCI do GLP (J / kg)	4,60E+07
Densidade da água (kg / m³)	1000
Eficiência Luminosa média (lm / W)	32,31
Fator de conversão unidade de vazão	1,67E-05
VARIÁVEIS CALCULADAS: (em regime)	
Vazão mássica de água (kg / s)	<b>1,166E-02</b>
Vazão mássica de gás (kg / s)	<b>1,687E-05</b>
Potência fornecida combustível (W)	<b>776,75</b>
Potência fornecida pelo módulo (W)	<b>5,64</b>
Potência fornecida trocadores de calor (W)	<b>439,25</b>
Potência fornecida iluminação (W)	<b>10,47</b>
Potência Total da unidade TEG (W)	<b>455,36</b>
Potência de Perdas (W)	<b>321,39</b>
Eficiência do módulo (%)	<b>0,73</b>
Eficiência dos trocadores de calor (%)	<b>56,55</b>
Eficiência do lâmpião (%)	<b>1,35</b>
Perda (%)	<b>41,38</b>
Eficiência global do sistema (%)	<b>58,62</b>

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)