



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
- Mestrado - Doutorado

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA DE ALTO
DESEMPENHO DE UM GRUPO: MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A
GÁS NATURAL – ALTERNADOR SÍNCRONO**

Por

ANTONIO WILTON ARAUJO CAVALCANTE

**Tese de doutororado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Doutor**

João Pessoa - Paraíba

Agosto, 2015

ANTONIO WILTON ARAUJO CAVALCANTE

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA DE ALTO
DESEMPENHO DE UM GRUPO: MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS
NATURAL – ALTERNADOR SÍNCRONO**

**Tese de Doutorado apresentada ao
curso de Pós-Graduação em
engenharia mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento
às exigências para obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Mecânica.**

Orientador : Profº Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

João Pessoa - Paraíba

Agosto, 2015

C376a Cavalcante, Antonio Wilton Araujo.
Análise energética e exergética de um sistema de alto desempenho de um grupo: motor de combustão interna a gás natural - alternador síncrono / Antonio Wilton Araujo Cavalcante.- João Pessoa, 2015.
138f. : il.
Orientador: Carlos Antônio Cabral dos Santos
Tese (Doutorado) - UFPB/CT
1. Engenharia mecânica. 2. Energia - quantidade e qualidade - Grupo de Motor Gerador (GMG). 3. Exergia. 4. Cogeração. 5. Poligeração.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

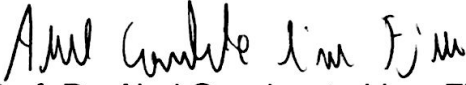
**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
POLIGERAÇÃO DE UM GRUPO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A
GÁS NATURAL - ALTERNADOR SÍNCRONO**

por

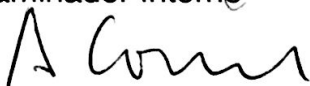
ANTONIO WILTON ARAUJO CAVALCANTE

Tese aprovada em 31 de agosto de 2015


Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos
Orientador


Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Examinador Interno


Prof. Dr. Francisco Antônio Belo
Examinador Interno


Prof. Dr. Alberto Coronas Salcedo
Examinador Externo


Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra
Examinador Externo


Prof. Dr. Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas
Examinador Externo

“... O sucesso prático de uma idéia,
independente do seu próprio mérito, depende
da atitude dos contemporâneos ...”.

Nikola Tesla (1856-1943)

AGRADECIMENTOS

Ao todo poderoso nosso senhor, aos meus filhos Antonio Henrique e Ana Beatriz e minha outra metade Kenia Queiroz Cavalcante.

Não importa a ordem ou o caos, o que importa é vocês, minha família Queiroz Cavalcante.

Ao orientador que passei a ser amigo desde 2008, professor Carlos Antonio Cabral dos Santos em que dificilmente pronuncia a palavra “não” para apoiar seus orientandos.

Ao professor Francisco Antonio Belo que me encorajou para dar seguimento à pós-graduação e ao professor Abel Cavalcante que sempre esteve disposto a ajudar.

Aos amigos adquiridos nesse convívio de anos Juanice Andrade que sempre pronta para ajudar, Luiz Eloi, Marcio Rocha, Francisco Camilo, Russo, Daniel Queiroz, Swokowski, Weiber, Túlio, Igor, Alisson, Marcos Cesar, Marcelo, Jobson e em especial ao professor doutor Lesso Santos que convivemos todos esses anos.

Aos profissionais e também amigos Diogenes, Sérgio, o grande SOLDA (Hernandes), Mônica, Iolanda e em memória (João de Deus).

Ao Instituto Federal do Ceará, em especial ao prof. Agamenôm e George que não mediam esforços para apoiar no meu doutorado.

Ao PPGEM-UFPB que me deu a oportunidade de realizar o curso de pós-graduação.

Meus Pais que sempre estiverão ao meu lado, e irmãos.

Minha sogra e amiga que na minha ausência cuidava dos meus filhos e esposa.

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA DE ALTO DESEMPENHO DE UM GRUPO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS NATURAL – ALTERNADOR SÍNCRONO

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Sistema de Alto Desempenho (SAD). O projeto desenvolvido apresenta três arranjos em que é analisado o desempenho em quantidade e qualidade energética para um grupo motor gerador (GMG) de 100 KVA inserido nos arranjos. Para cada estudo, os comportamentos dos fluxos de energia são distintos, o que possibilitará analisar a melhor estrutura do SAD. As unidades que constituem o projeto são um subsistema de refrigeração por absorção água-amônia, um recuperador de calor e uma usina de produção de biodiesel. Foram realizados ensaios com esses subsistemas individualmente caracterizando-os como sistemas de cogeração. Posteriormente, foram integrados todos em um só sistema, sendo então classificado como sistema de trigeração. Esse trabalho também analisa o comportamento das cargas elétricas por analisador de energia e análise térmica por câmera termográfica.

Palavras-chaves: energia, exergia, cogeração, poligeração

**ANALYSIS ENERGY AND EXERGY OF A SYSTEM HIGH
PERFORMANCE MOTOR GROUP COMBUSTION INTERNAL GAS
NATURAL - ALTERNADOR SYNCHRONOUS ALTERNATOR**

ABSTRACT

This paper presents the development of a High Performance System (HPS). The project has three settings developed that analyze the performance in quantity and quality energy for a generator engine Group (GEG) 100 KVA inserted in settings. For each study, the behavior of energy flows are decoupled, making it possible to analyze the best structure of the HPS. The unit constituents of the project were a subsystem cooling by absorbing water – ammonia chiller, a heat recover and a biodiesel production plant. It with these subsystems will work separately characterizing them as cogeneration systems. After that it will be integrated all in one system and then classified as trigeneration system. This work also aims to analyze the behavior of electric charges by energy analyzer and temperature by thermal imager.

Keywords: energy, exergy, cogeneration, polygeneration

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	01
1.1 INTRODUÇÃO	01
1.2 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO	04
1.3 OBJETIVOS DA TESE	07
1.3.1 Objetivo Geral	07
1.3.2 Objetivos Específicos	07
1.4 COMPOSIÇÕES DA TESE	08
CAPITULO II	10
2.1 ESTADO DA ARTE	10
2.2 SISTEMAS DE ALTO DESEMPENHO NA COGERAÇÃO	17
2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA	19
2.3.1 Energia	20
2.3.2 Geração Distribuída	22
2.4 GÁS NATURAL	24
2.4.1 Extração do Gás Natural	27
2.4.2 Propriedades do Gás Natural	29
2.4.3 Poder Calorífico do Gás Natural	31
2.5. ESTRUTURA DA PLANTA DE COGERAÇÃO	33

2.5.1 Motor de Combustão Interna	35
2.5.2 Gerador Síncrono	37
2.5.3 Sistema de Refrigeração	39
2.5.4 Planta de Cogeração	41
CAPITULO III	45
3.1 ANÁLISES ENERGÉTICAS E EXERGÉTICO	47
3.1.1 Eficiência Energética e Exergética	47
3.1.2 Primeira e Segunda Lei	50
3.1.3 Análise Exergética	52
3.1.4 Potência Energética	55
3.1.5 Potência Exergética	57
3.2 QUALIDADE DE ENERGIA	60
3.3 SISTEMA AMÔNIA-ÁGUA (NH₃ /H₂O)	64
3.3.1 Gerador de Vapor	67
3.3.2 Recuperador de Calor	68
3.4 USINA DE BIODIESEL	71
3.4.1 Implementação do Biodiesel	71
3.4.1 O Biodiesel	72
3.4.2 Usina de Biodiesel	74
CAPÍTULO IV	78
4.1 MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO	78
4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO MOTOR GERADOR	79

4.2.1 Estrutura do Grupo Motor Gerador	80
4.2.2 Quadros de Operação	83
4.2.3 Operação do GMG	86
4.2.4 Arrefecimento do GMG	86
4.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO	89
4.3.1 Medição de Aterramento	90
4.3.2 Dimensionamento das Hastes de Aterramento	92
4.4 MEDIÇÃO DA VAZÃO DO FLUÍDO DE ÓLEO	95
4.4.1 Transdutores de temperatura	95
4.4.2 Medidor de Vazão	97
4.4 ESTUDO DOS GASES	99
4.5 ESTUDO TERMOGRÁFICO	101
4.6 RUÍDOS	102
4.7 ANALISADOR DE ENERGIA TRIFÁSICO TRUE-RMS, CAT III 1000	105
 CAPITULO V	 107
5.1 OPERAÇÃO DO SITEMA ELÉTRICO	107
5.1.1 Diagrama Multifilar e Distribuição de Cargas	107
5.1.2. Estudo dos Níveis de Energia do Alternador	108
5.2 POTÊNCIAS DO SAD	110
5.2.1 – Valores de Temperatura nas medições	110
5.2.2 Potência Energética do SAD	112
5.2.3 Potência Exergética do SAD	120

5.2.4 Diagramas de Sankey e Grausmann	121
5.2.4.1 Diagrama de Sankey	122
5.2.4.2 Diagrama de Grassman	124

CAPITULO VI

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

APÊNDICE A

A.1 – VALORES MEDIDOS PARA O ARRANJO 1

A.2 – VALORES MEDIDOS PARA O ARRANJO 2

A.3 – VALORES MEDIDOS PARA O ARRANJO 3

MEDIDAS DOS TERMOPARES PENTAFIVE

APENDICE C

MEDIDAS POR TERMÔMETRO INFRAVERMELHO PARA IRRADIAÇÃO

APÊNDICE B – ANÁLISE DOS GASES DE EXAUTÃO PARA MCI A G NATURAL

APÊNDICE C –

APÊNDICE D – DIAGRAMA UNIFILAR DO QUADRO

A.1 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO MINERAL

A.2 – VALORES CONSTANTE DE ALGUNS PARÂMETROS DO

ÓLEO

ANEXO A

**LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
COGERAÇÃO**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Fluxo de energia global a partir de fontes energéticas (TW)	06
Figura 2.1	Eficiência superior do sistema de trigeração as demais tecnologias competitivas	11
Figura 2.2	Diagrama esquemático do Sistema de Trigeração: Eletricidade-Frio-Aquecimento	12
Figura 2.3	Diagrama de fluxo para o sistema de trigeração operando com motor de combustão interna	14
Figura 2.4	Esquema de produção de biodiesel no processo de transesterificação de óleo vegetal	15
Figura 2.5	Diagrama esquemático do sistema trigeração simples alimentando uma edificação	16
Figura 2.6	Estrutura de fluxograma de um modelo de alto desempenho	18
Figura 2.7	Taxa de crescimento referente aos anos de 1980 até 2004 (adaptado)	21
Figura 2.8	Gasodutos distribuídos no território brasileiro e na Bolívia	25
Figura 2.9	Participação do gás natural na produção de energia e no setor de geração de eletricidade (Brasil)	26
Figura 2.10	Conversões de várias energias	33
Figura 2.11	Comparação entre os dois ciclos teóricos: Otto e Diesel	36
Figura 2.12	Conexão das bobinas do estator em ligação “estrela”; (b) Gerador elétrico	38
Figura 2.13	O ciclo de refrigeração por absorção, adaptado	40
Figura 2.14	Esquema ilustrado do sistema de cogeração do ciclo topping e bottoming	43
Figura 2.15	Vista panorâmica do SAD	44

Figura 3.1	Planta baixa para o Arranjo 1	45
Figura 3.2	Planta baixa do Arranjo 2	46
Figura 3.3	Planta baixa do Arranjo 3	46
Figura 3.4	Balanço de um sistema combinado térmico e elétrico	48
Figura 3.5	Comportamento gráfico dos impactos ambientais e a sustentabilidade com relação a eficiência exergética	48
Figura 3.6	Temperaturas estabelecidas de uso e sua eficiência exergética	50
Figura 3.7	Esquema de transferência de calor para trabalho em dois estados	50
Figura 3.8	Modelo conceitual de exergia	53
Figura 3.9	Estrutura do Diagrama de Grassman para uma conversão de processo exergético	57
Figura 3.10	Fluxo de exergia no sistema de cogeração usando Diagrama de Grassmann	59
Figura 3.11	Percentual da queda de tensão em função do percentual de elevação de corrente numa carga de 5 CV	61
Figura 3.12	Níveis de afundamento de tensão com o ciclo de interrupção	62
Figura 3.13	Representação dos fluxo de energia à carga	64
Figura 3.14	Modelo do Ciclo de Refrigeração por absorção	64
Figura 3.15	Esquema do ciclo do equipamento fornecido pelo fabricante	66
Figura 3.16	A fonte de calor original alimentando o gerador (a), aberta e adaptada (b) para receber fluxo de calor (c)	66
Figura 3.17	Fluxograma do sistema de trigeração - arranjo 3 (tipologia 3)	67
Figura 3.18	Volume de Controle do Gerador e do Recuperador de Calor	68
Figura 3.19	Representação esquemática do recuperador de calor	70
Figura 3.20	Estrutura molecular do biodiesel	73
Figura 3.21	Estrutura química completa do biodiesel	75

Figura 3.22	Usina de biodiesel	75
Figura 3.23	Serpentina que irá circular o óleo aquecido; (b) serpentina instalada no reservatório da reação de transesterização; e (c) reservatório instalado na usina de biodiesel.	77
Figura 4.1	Instalações do GMG. Detalhe para o circuito de controle no acionamento do exaustor.	80
Figura 4.2	Alimentação do combustível a gás natural ao GMG	81
Figura 4.3	Fluxo de energia térmica e elétrica no GMG	82
Figura 4.4	Esquema de comando da seleção da alimentação elétrica.	83
Figura 4.5	Circuito de Comando Multifilar do QGMG	84
Figura 4.6	Circuito de Comando Multifilar do QGF	84
Figura 4.7	(a) Circuitos de acionamento do GMG e (b) válvula de controle do gás natural.	85
Figura 4.8	Distribuição das perdas por irradiação para o GMG (adaptado)	87
Figura 4.9	Saída de ar de arrefecimento do MCI (b) subáreas para a medição da vazão do ar de arrefecimento e (c) duto projetado para viabilizar as medições de vazão	88
Figura 4.10	Terrômetro usado na medição de aterramento do SAD.	91
Figura 4.11	Esquema de ligação de um sistema de medição da resistência de terra	92
Figura 4.12	(a) Desenho de Caixa de passagem de aterramento e alimentação vindo do transformador (b) Imagem do aterramento na caixa de passagem. (c) Aterramento do GMG e do (d) Quadro Geral de Força.	93
Figura 4.13	Nível de potencial em hastes de aterramento	94
Figura 4.14	Leitura da resistência de terra	94
Figura 4.15	Gráficos referentes a valores de termopar	96
Figura 4.16	Pontos de medição de temperatura	97
Figura 4.17	Medida da vazão pelo método V	98
Figura 4.18	Estrutura da tubulação do fluxo	100

Figura 4.19	Bancada de ensaio dos gases usando o PC MULTIGÁS	101
Figura 4.20	Análise dos gases CO ₂ e NO _x	101
Figura 4.21	Elevada corrente na partida do MCI	102
Figura 4.22	Imagens da termografia do motor de combustão interna em operação.	103
Figura 4.23	Analizador de rede para visualizar o comportamento da geração e consumo de energia (imagem do fabricante HOMIS (2015))	105
Figura 5.1	Comportamento dos níveis de energia do arranjo 3 do SAD	108
Figura 5.2	Comportamento dos níveis de energia do arranjo 2 do SAD	108
Figura 5.3	Comportamento dos níveis de energia do arranjo 1 do SAD	109
Figura 5.4	Comportamento da KVA e FP	109
Figura 5.5	Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 1.	110
Figura 5.6	Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 2	110
Figura 5.7	Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 3	111
Figura 5.8	Variações das temperatura no reservatório da usina nos arranjos 2 e 3	112
Figura 5.9	Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 1	122
Figura 5.10	Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 2	123
Figura 5.11	Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 3	123
Figura 5.12	Diagrama de Grassmann das exergias envolvidas na produção de eletricidade, aquecimento e frio	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Três Modelos de Trigeração	12
Tabela 2.2	Tecnologias de Máquinas Primárias para a Geração	24
Tabela 2.3	Divisão de Capacidade de Geração Distribuída	24
Tabela 2.4	Produção e uso da energia no mundo (adaptado)	28
Tabela 2.5	Percentual da massa dos elementos constituintes do gás natural	29
Tabela 2.6	Composição média do gás natural da PBGÁS	30
Tabela 2.7	Valores Médios da propriedade do Gás Natural da PBGÁS	30
Tabela 2.8	Características de alguns Sistemas de Cogeração	34
Tabela 2.9	Grupo motor gerador da Leon Heimer S/A	34
Tabela 2.10	Resultados da fração de massa ar / combustível	36
Tabela 2.11	Estrutura dos Sistemas de Cogeração	42
Tabela 3.1	Intervalo dos parâmetros para SAG e SWELL	62
Tabela 3.2	Produção de Biodiesel em alguns setores (10^3m^3)	72
Tabela 3.3	Propriedades parciais da mistura de biodiesel e diesel (adaptado)	73
Tabela 4.1	Valores de velocidade e temperatura de arrefecimento	89
Tabela 4.2	Valor da vazão do fluido	99
Tabela 4.3	Níveis de Ruído propagado pelo GMG	104

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Relação ar combustível
C	Percentual mássico de Carbono
c_p	Calor específico (kJ/kg.K)
Carga	carga de operação do motor (%)
E	Energia
ex_{comb}^{qui}	exergia química do combustível
ex	Exergia específica (kJ/kg)
Ex	Exergia total (kW)
Ex^Q	Exergia Química (kJ/kg)
F	Combustível
h	Entalpia específica (kJ/kg)
H	Entalpia Total (kW)
I	Irreversibilidade (kW)
m	massa
P	Pressão (bar)
PCS	Poder calorífico superior (kJ/kg)
PCI	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
Q	Calor (kW)
$\dot{Q}$	Taxa de Calor (kW/s)
R	Constante universal dos gases (kJ/kmol-K)
s	Entropia específica (kJ/kg.K)
SAD	Sistema de Alto Desempenho
T	Temperatura (°C)

t	Tempo (s)
u	Energia interna específica (kJ/kg)
V	Velocidade (m/s)
v	Volume específico (m ³ /kg)
V _{arref}	Vazão de arrefecimento (m ³ /s)
W	Trabalho (kW)
$\dot{W}$	Taxa de trabalho (KW/s)
X	Concentração da solução de amônia (kg Amônia /kg Solução)
X	Fração volumétrica
Z	Cota (m)

Letras Gregas

η	Eficiência de primeira lei
ρ	Massa específica (kg/m ³)
ε	Eficiência de segunda lei
ϕ	Relação entre a exergia e o PCI do combustível
Σ	Somatório
Δ	Diferença

Sobrescritos

ch	Química
f	Termofísica
k	Cinética
ΔT	Parcela de variação da temperatura
ΔP	Parcela de variação da pressão
p	Potencial
.	Em cima das letras refere-se a taxa ou vazão mássica

Subescrito

ab	Absorvdor
----	-----------

ag	Água
b	Bomba
c	Condensador
comb	Combustível
ch	Química
e	Entrada
ele	Elétrica
ev	Evaporador
f	Insumo
g	Gerador
gases	Gases de exaustão
gn	Gás Natural
i,j,k	Fluxo Genérico
m	motor
mis	mistura
op	Operação
óleo	óleo
p	Produto
real	Condição estequiométrica
rec	recuperador de calor
ret	Retificador
s	Saída
sat	Saturação
tip	tipologia
tc	Trocador de calor
ter	Térmica
v	Vapor
0	Condição ambiente (27°C,e 1 atm)
vc	Volume de controle

CAPITULO I

1.1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, o rápido desenvolvimento das tecnologias da informação, da biologia, da genética, da tecnologia nuclear, do transporte automotivo, da eletrificação e da máquina térmica tem revolucionado as condições de vida individual, social, econômica e política.

As ideias tecnológicas motivadoras da economia mundial pela ausência do futuro da economia fóssil contradizem com a dependência dessas (energia fóssil) a nível global de quase todas as atividades da humanidade, pelo atual abastecimento energético. Em décadas passadas (anos 80), melhorias e inovações de tecnologias se dava em parte, pelo interesse em diminuir o consumo e os insumos dos combustíveis por questões econômicas.

Na revista do Ministério de Minas e Energia (MME), o Modelo Energético Brasileiro na versão II afirma que a energia hidráulica é responsável por 92% da geração elétrica, o que acarreta pouca dependência ao petróleo e contraria países desenvolvidos dependentes dessa fonte (BRASIL, 1981). Esta visão antiga do MME (anos 80) reforça o desinteresse em novas tecnologias de geração de energia, se não a hidráulica, mesmo afirmando em sua pesquisa a época, que o país apresentava uma das maiores reserva de xisto oleígenos do mundo.

Leite (2013) apresenta resultados sobre a utilização dos combustíveis fósseis, e coloca em questão o retorno a investimentos inovadores. Os Estados Unidos da América passaram a usar gás a partir da exploração de folhelhos, que são tipos de rochas semelhantes a argilas diferenciadas por possuírem lâminas finas e paralelas desprendidas. Nas plataformas continentais do Brasil e Golfo do México a descoberta de grandes reservas de pré-sal estimulam o uso dos combustíveis fósseis.

O aumento do consumo de energia cresce num ritmo superior ao populacional e ao de produção de bens e serviços. Estes problemas demandam políticas focadas no estímulo às novas ideias tecnológicas e de investimentos. Tais políticas decorrem da necessidade da aceleração do desenvolvimento.

O investimento em novas tecnologias é mais difícil de financiar por seu alto custo. Geralmente, o produto de uso-final dessa tecnologia é adquirido pelo consumidor que realizou esses investimentos de modo indireto. Na construção desses produtos, as grandes companhias e o governo são os desafiantes do mercado.

Outra solução para o problema abordado diverge do pensamento global, que seria diminuir o ritmo da produção de energia realizado pelo lado da demanda em aplicações eficientes de energia. O crescimento econômico sustentável com menor uso de energias naturais e inovação tecnológica são posições eficientes da energia. A falta de conscientização do desperdício é outro fator que o país deve melhorar.

Neste trabalho, é desenvolvida uma unidade piloto de sistema de reaproveitamento da energia (fóssil, térmica) para estudo e avaliação de desempenho no laboratório do Instituto de Energias Sustentáveis (IES). A ideia é verificar dados e o comportamento no intuito de apresentar soluções viáveis não só aos processos produtivos de geração de eletricidade e calor, como também, no conforto térmico, denominado Sistema de Auto Desempenho (SAD).

Existindo o aumento sustentado das demandas de energia elétrica e térmica, há uma obrigação da melhoria da qualidade do fornecimento, utilizando fontes secundárias de energia, como as reservas promissoras do gás natural. Fatores como confiabilidade, consumo de combustível, custo de operação e emissões são critérios a serem considerados na escolha de um motor de combustão interna (MCI) como máquina primária para geração de eletricidade.

O calor proveniente dos gases de escapamento do motor escolhido deve possibilitar o reaproveitamento numa unidade de refrigeração. Esses tipos de unidades já foram utilizados em trabalhos do grupo do IES como o de: Queiroz (2013), que consta uma máquina de refrigeração por absorção de simples efeito usando água amônia; Andrade (2010) trabalhou numa máquina de refrigeração por absorção de duplo efeito utilizando água brometo de lítio.

Chua, Toh e Ng (2002) trabalham com um modelo termodinâmico de um sistema de absorção de simples efeito usando água amônia. O modelo do sistema é baseado numa equação macroscópica que permite analisar as eficiências e perdas.

Para as análises das plantas de alto desempenho nas unidades de refrigeração por absorção usada no IES, um código computacional foi desenvolvido na plataforma EES (*Engineering Equation Solver*) que compara dados experimentais.

O software EES tem um banco de dados que possui rotinas com propriedades termodinâmicas de várias misturas e concentrações, como por exemplo, a água-amônia, sendo limitado apenas para soluções numéricas de sistemas lineares ou não lineares de equações diferenciais ou algébricas.

No trabalho desenvolvido por Queiroz (2013), a simulação energética e exergética do ciclo de refrigeração por absorção passam por estudos dos componentes que constitui a máquina de refrigeração: Gerador; Condensador; Evaporador; Absorvedor; Válvulas; Bomba de solução; e Recuperador de calor.

No estudo do SAD há quadros de possibilidades para o uso e reuso das energias térmica e elétrica. O acoplamento de um recuperador de calor à saída dos gases de escape do motor ou da unidade de refrigeração, na troca de calor com gases e a usina de biodiesel para aquecimento de um fluido de óleo (reaproveitamento da energia que seria perdida) são aplicações a serem apresentadas neste trabalho.

O SAD oferece energia e benefícios ambientais em relação aos sistemas elétricos e térmicos convencionais, já que há produção simultânea térmica e elétrica e com redução na produção do teor de poluentes ao usar combustíveis de queima mais limpa.

A última avaliação realizada no ano de 2007 no *International Panel on Climate Change* com apresentações periódicas desde 1990 e as demais em 1995, 2001 e 2007, aponta cerca de 70% entre os anos de 1970 a 2004, aumento das emissões relacionadas a atividades humanas (LEITE, 2012). Para o dióxido de carbono, 59% dessas emissões provêm da queima de combustíveis fósseis. No Brasil, Bermann (2002) apresenta a partir de dados do Balanço Energético Nacional (BEN) a evolução dos gases CO₂ emitidos ao longo de duas décadas (1980 a 1999) por fontes energéticas. Portanto, o gás natural ao ser inserido na matriz energética e o aumento do consumo dos derivados de petróleo, Bermann (2002) vislumbra o aumento de CO₂, contrariando políticas nacionais e internacionais climáticas.

As emissões de dióxido de carbono por unidade de energia produzida é um índice importante numa planta de desempenho e, uma abordagem sobre uma melhor eficiência desse gás nas emissões seria um ciclo combinado híbrido (BASU, 2006). Para Marion *et al* (2015) o dióxido de carbono é um dos gases do efeito estufa mais importantes e por isso, tem recebido maior atenção no controle de emissões e sua

redução pode ser obtida pelo aumento da eficiência e utilização da energia que o produz.

Esses fatores, térmico e ambiental, fazem com que a eficiência energética e exergética melhorem com potencial para diversas aplicações.

Serão desenvolvidos estudos de três tipologias para a unidade do SAD localizada no ponto de uso de energia (carga próxima da geração). A produção de eletricidade no local evita a distribuição primária (análise macro), ou distribuição secundária (análise micro) as perdas associadas com energia elétrica comprada pela rede convencional. No caso específico desse trabalho, seria um percentual da rede UFBP, numa análise de micro cogeração autônoma.

1.2 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

A geração de alto desempenho torna-se uma via interessante diversificada nos setores dependentes de energia elétrica e térmica. Um caso específico da crise energética é um exemplo.

Os consumidores finais, em sua maioria, apresentam características próprias, não necessariamente, permitindo um comportamento ideal com as cargas elétricas e térmicas da matriz energética. Para os grandes consumidores, sistemas projetados atendem as demandas energéticas e se beneficiam com a comercialização de excedentes.

Na condição para pequenos consumidores, deve haver estudos de projetos específicos na instalação de sistemas numa matriz energética, o que pode deixar complexo em relação aos grandes consumidores. Um principal fator para ambos consumidores é a feitura na redução dos desperdícios e aplicar eficiência energética.

Nos prédios públicos, a eficiência energética pode ser utilizada da mesma forma que ocorre na grande maioria dos supermercados privados. A entrada de geradores elétricos nesses estabelecimentos, em momentos de demanda alta no sistema da rede elétrica do local, tem como intuito baixar o fator de potência, evitando assim multas da concessionária local, que acarretaria valor superior ao que se utiliza ao usar o gerador.

Nas universidades, podemos citar restaurantes e hospitais universitários, além de outros setores que devem estar preocupados com a demanda contratada. Em cada setor a ser estudado, surgirão situações distintas por apresentar, em cada uma,

particularidades próprias.

A eficiência energética, no sistema de alto desempenho de calor e eletricidade (SAD), pode ser observada a partir do processo de geração de energia nas mais variadas formas de fonte primária, para fins úteis. Os combustíveis usados variam muito e podem ser: carvão, óleo, gás, entre outros. A figura 1.1 mostra a energia que flui no sistema de eletricidade global gerada com cerca de 36% (IEA, 2011).

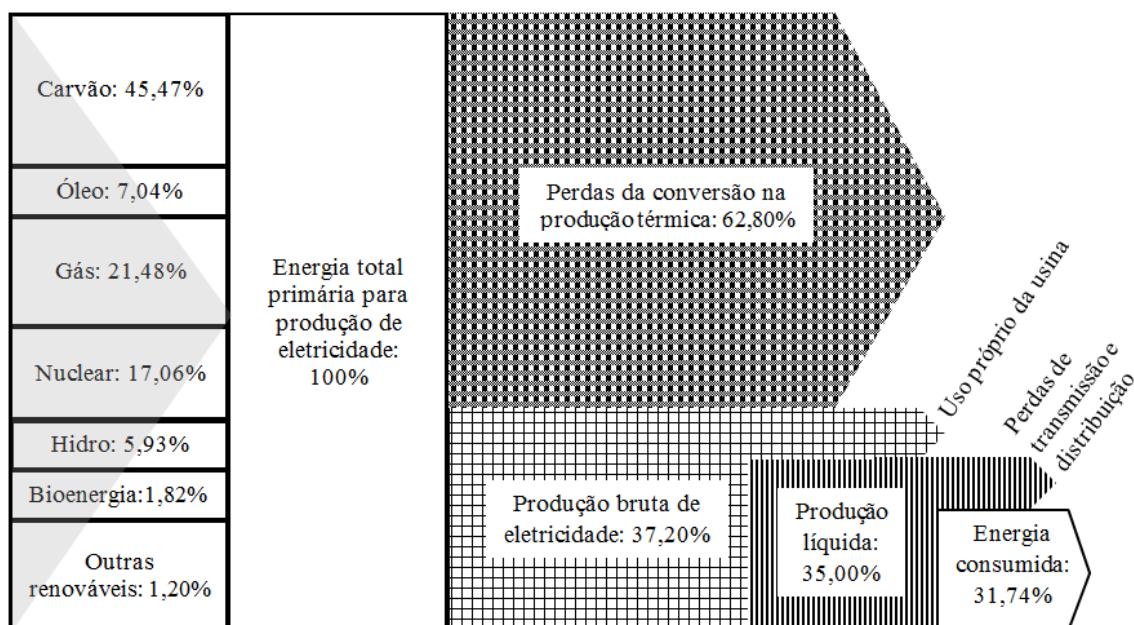
As demais energias, em torno de dois terços do calor desperdiçado durante a geração de energia, partem do mesmo combustível, para fins úteis.

A necessidade da alta eficiência dos sistemas de cogeração deve ser observada por conta da geração de energia elétrica. Podemos observar na figura 1.1, a análise da IEA (*International Energy Agency*) do fluxo de energia a partir de uma única fonte de combustível para produzir eletricidade.

A alta eficiência em uma planta CCHP (*combined cold-heat-and-power*) deve corresponder a 37,20% aproximadamente da produção de eletricidade. A seta maior da figura 1.1 (perdas da conversão na produção térmica) estima um valor de 2/3 de produção térmica, resultante da combustão da energia primária contra as perdas totais na geração de energia elétrica de 9% (perdas de uso próprio da usina com as de transmissão e distribuição).

Em específico, o ambiente do Laboratório de Energias Renováveis, que já trabalha há mais de quatro décadas com pesquisa, e atualmente associado à RECOGÁS, apresenta um espaço convincente para estudos e análises de autoprodução com uma pequena fonte energética geradora. O intuito é de realizar ensaios de consumidores por cargas térmicas e elétricas.

Outro fator motivador é o desenvolvimento do sistema que fornece energia térmica a partir do trocador de calor e ao mesmo tempo, energia elétrica para bombas, resistências elétricas em uma usina de biodiesel que se encontra em fase de finalização. Essa poderá ser suprida com vapores de processos extraídos do MCI, para manter aquecido o óleo que circula numa serpentina e que deverá manter níveis empíricos de temperatura estimados (30°C a 50°C) no processo de produção do biodiesel.



Fonte: IEA, 2008, adaptado.

Figura 1.1 Fluxo de energia global a partir de fontes energéticas (TW)

Para finalizar, a grande crise energética de 2001, decorrente da alta demanda de consumo com baixa oferta da energia, ocasionou o fenômeno chamado para a época de “apagão”. Entre os fatores que levaram a essa crise energética, o aumento do consumo com o baixo nível de reservatórios das hidroelétricas – sistema de energia que corresponde cerca de 75 % do potencial energético e a carência de investimentos no setor de geração. Nos dias de hoje, especificamente nos meses de janeiro a março deste ano, os níveis de reservatórios começaram a chegar aos níveis de 2001, repetindo a história da época.

O apagão ocorrido em 2001 apresentava, segundo o Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS), níveis de armazenamento que resguardavam um fornecimento de energia no período de até um semestre. Hoje, o consumo aumentou levando para um resguardo de até quatro meses e meio. Portanto, a capacidade do sistema hídrico brasileiro que regulariza a disponibilidade de energia está diminuindo. Com isso, a diversificação da matriz energética passa a ser imprescindível com parques de geração diferentes (BRASIL, 2014).

A solução do problema em definir a melhor forma de fazer e contratar essa diversificação não é tão simples. Para Castro, Brandão e Dantas (2011), o parque de geração térmica aumentou com incremento recente em usinas a gás natural. No caso das usinas a óleo, as diversificações no parque de geração térmica já existiam.

Decorrente a isso, as termoelétricas estão operando em força total para que o país não volte a repetir o apagão. As distribuidoras aglomeram prejuízos, isso porque a demanda contratada das térmicas é superior às das hidroelétricas. Decorrente aos lucros decrescentes das concessionárias, o governo federal sinalizou com apoio financeiro. No entanto, este dinheiro é devolvido ao governo pelas concessionárias que reajustam as tarifas de energia elétrica neste ano de 2015 e aplicam em ressonância com o mercado elétrico a “bandeira” tarifária.

1.3 OBJETIVOS DA TESE

A escolha de sistemas de poli geração, com o interesse de melhoria de eficiência desses sistemas, busca os seguintes objetivos:

1.3.1 Objetivo Geral

No estudo da geração e do reaproveitamento, ambos energéticos e exeréticos, propõe-se aplicar estruturas diversificadas, no intuito de analisar o melhor aproveitamento para cargas elétricas e térmicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Registrar levantamentos bibliográficos que fundamentam sistemas de poli geração em diversas aplicações;

Esquematizar arranjos de poli geração operando em estruturas distintas que poderão estabelecer comparações entre si;

Explicar as equações de energia e exergia, bem como os produtos da queima do combustível e comburente;

Relacionar e ilustrar os arranjos desenvolvidos nos mais variados perfis de carga (motores elétricos, resistências elétricas, dispositivos eletrônicos e outros) que serão alimentados por um gerador síncrono que tem como máquina primária um MCI;

Elaborar planilhas a partir dos dados obtidos dos protótipos desenvolvidos e apresentar do modo gráfico os níveis de energia e exergia que se comportam os arranjos.

1.4 COMPOSIÇÕES DA TESE

Na introdução deste trabalho são mostrados problemas, que delimitam a partir da caracterização do tipo de consumidor estudado, e para o qual, será proposta uma metodologia de projeto no atendimento das suas necessidades energéticas (térmica e elétrica).

A estrutura proposta do sistema é de autoprodução, permitindo autonomia de energia e o reaproveitamento num sistema de cogeração e trigeração. Portanto, será abordada a pesquisa na área de geração distribuída com novas tecnologias empregadas no capítulo dois.

Apresenta-se um estudo bibliográfico sobre a importância da implementação do gás natural como fonte primária a ser usado na planta piloto, apresentando vantagens desse combustível em relação a outros que chegam a prejudicar mais o meio ambiente com seus gases poluentes expedidos pelo escapamento dos motores de combustão interna alimentados por gasolina ou diesel, por exemplo. O capítulo dois ainda contempla a descrição de estruturas de sistemas de cogeração generalizadas e discutido a estrutura do sistema de poli geração e seus subsistemas aplicados nesta tese e estudo da arte.

Os capítulos três e quatro apresentam discussões englobando aspectos fundamentais do sistema e subsistemas que envolvem as leis da termodinâmica, além da análise energética e exegética dos processos que constituem o todo. As ferramentas estruturais para a realização dos ensaios e medições são discutidas, bem como o desenvolvimento de sensores, acionadores, sistemas de proteção. O fator ambiental também é discutido, visando mostrar que os ganhos são direcionados a vários setores de energia e causas, propiciando uma análise extensa do ponto de vista da eficiência elétrica, térmica e ambiental.

A metodologia de análise de plantas térmicas e elétricas empregadas no desenvolvimento do problema são baseadas na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Posteriormente a análise da manutenção do sistema como um todo e a qualidade da energia elétrica fornecida às cargas elétricas já mencionadas. Isso será abordado no capítulo cinco que traz aspectos abordados nos capítulos anteriores da tese para discutir resultados obtidos através dos ensaios realizados.

Reforçando a preocupação com os gases emitidos nos motores de combustão interna, há a possibilidade da verificação dos limites legais das legislações aplicáveis desses gases, bem como a referência para a validação de modelos de combustão em etapas de desenvolvimento e verificação de conformidade. Há três itens essenciais utilizados para compor as medidas de emissão (BRUNETTI, 2012):

- Conjunto de procedimentos de preparação do objeto a ser testado e equipamentos de medição;
- Ciclo a que o motor será submetido e;
- Limites de emissão de gases e partículas aplicadas na legislação.

O combustível nos testes do motor estacionário de ciclo *Otto* utilizado neste trabalho, em geral contém hidrocarbonetos mais leves e são menos robustos do que o de ciclo diesel.

O capítulo seis traz considerações a respeito dos métodos de análise e dos efeitos em que cada sistema com seu arranjo (1, 2 ou 3) oferecem. Apresenta também sugestões que deverão ser melhoradas e aprimoradas para futuros trabalhos no SAD.

CAPITULO II

2.1 ESTADO DA ARTE

O uso de calor, a partir de uma fonte de combustível que gera energia elétrica, nas centrais de cogeração moderna alcança ganhos de eficiência de 90% ou mais. Uma das características de cogeração é que estão localizados próximos do consumidor final.

Uma observação a ser considerada é que um sistema de cogeração seria a produção de duas formas de energia, a partir de uma única alimentação. No artigo de Medved (2011), é abordado o conceito para um sistema de trigeração, ou simplesmente de alto desempenho (nota do autor), no qual, a alimentação de uma fonte primária, poderá transformar em três tipos diferentes de energia. Na utilização de trigeração, os percentuais de eficiência ficam no intervalo de 86% a 93%.

O gráfico da figura 2.1 representa diversificadas implementações de sistemas de geração e sua reutilização com relação a capacidade de energia e eficiência. A tecnologia de trigeração excede as demais (conforme gráfico) na disponibilidade potência e energia. Arteconi, Brandony e Polonara (2009) desenvolvem projetos de poligeração que viabilizaram a geração de energia elétrica, o aquecimento e a refrigeração com o aumento de geração de energia com seu reaproveitamento, demonstrando uma melhoria na disponibilidade de produção energética.

Fong e Lee (2014) realizaram uma análise de desempenho que trata do fator ambiental e da energia com a utilização da trigeração tendo como fonte primária o motor de combustão interna alimentado a gás natural. As comparações são realizadas em fontes térmicas para aquecimento e refrigeração e o uso da eletricidade nas edificações de pequeno e grande porte na cidade de Hong Kong. Nessa análise foi constatada uma economia de demanda energética com a redução de 10,4% durante o ano todo com o uso do gás natural. Com a utilização de outra fonte de combustível, no caso o óleo diesel, o percentual é menor. Questionamentos sobre a utilização, por

exemplo, de outras fontes energéticas como a solar, eólica, turbinas a vapor que poderiam ser implementadas com o sistema de trigeriação foram desconsideradas por apresentar custos maiores, tornando-se, portanto obstáculos ao uso dessas fontes em comparado ao do motor de combustão interna. No artigo, são colocadas referências literárias que justificam nos sistemas de trigeriação, o uso do motor de combustão interna um dos mais aplicados.

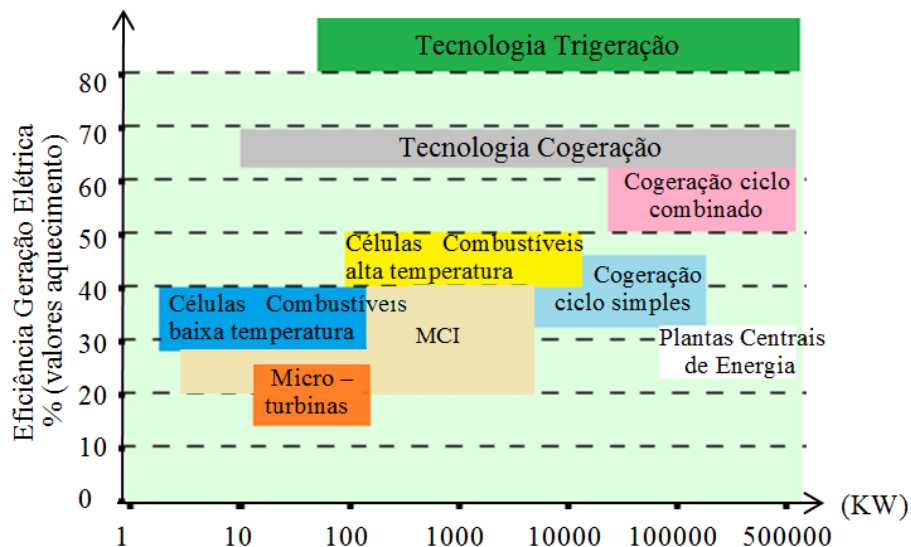


Figura 2.1 Eficiência superior do sistema de trigeriação as demais tecnologias competitivas.

A figura 2.2 representa o diagrama esquemático do sistema implementado em que são apresentados os desafios do sistema de trigeriação que tem a principal necessidade de frio ser pouco em épocas que não necessitem demanda alta. No entanto, a necessidade de aquecimento ser mínima para esses períodos. As dificuldades são postas quando se faz o estudo desses dimensionamentos de carga que são variáveis durante períodos do ano. O projeto consiste diferentes tipos que podem ser modelados e simulados no TRNSYS como componentes e parâmetros padrões. O rendimento apresentado na alimentação a gás natural para o gerador elétrico foi de 32,7%, o calor recuperado de 27,0 % no trocador de calor e as perdas na carcaça do motor de 13,1%.

Os autores Gopisetty e Treffinger (2013) publicaram um artigo com os trabalhos desenvolvidos na *Offenburg University of Applied Sciences* com o sistema de trigeriação posto em operação a partir do ano de 2008. No projeto construído não é apresentado um padrão arquitetônico de seleção de subsistemas. Duas caldeiras, micro turbina e motor de combustão interna são os conversores de energia responsáveis em atender as

demandas térmicas e elétricas. Para a demanda de aquecimento, a potência é de 3294 KW, resfriamento de 405 KW e de eletricidade de até 530 KW em horário de pico. A implementação e instalação desse projeto em cinco complexos edificadas da *Hochschule Offenburg* para geração de água quente, água fria e eletricidade nos modos de inverno, transição e verão tiveram ênfase na operacionalidade. No artigo estão representados os três modos de operação, no qual é mostrado de modo resumido na tabela 2.1 a seguir.

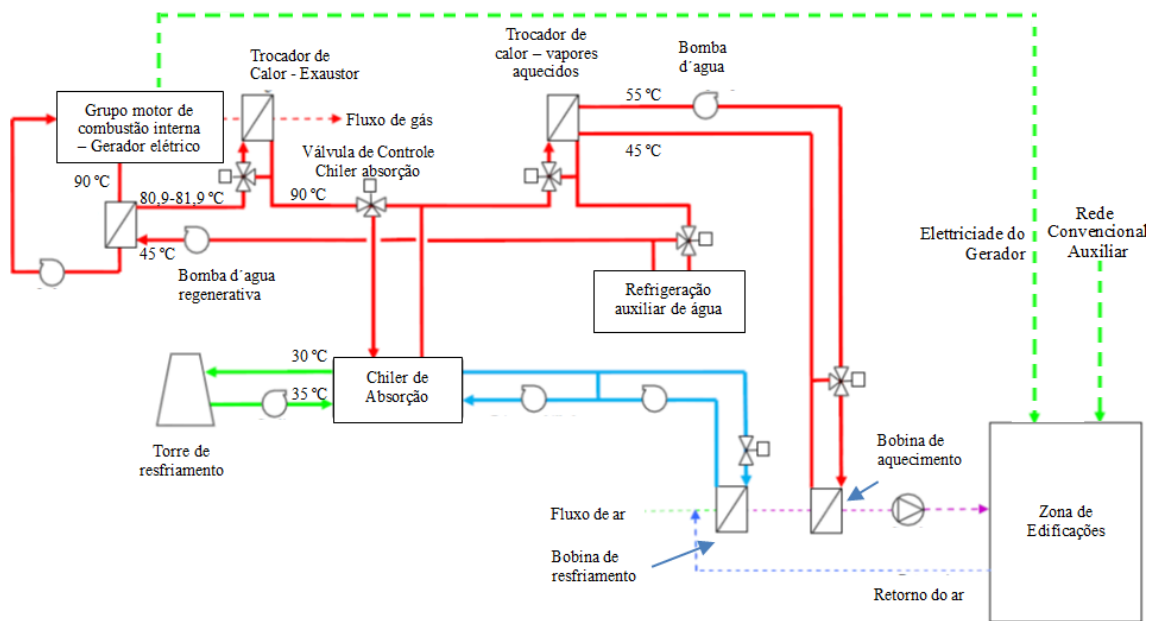


Figura 2.2 Diagrama esquemático do Sistema de Trigeração: Eletricidade-Frio-Aquecimento

Tabela 2.1 Três Modelos de Sistema de Trigeração

Modelo	Carga				Observações
	Aquecimento_1	Aquecimento_2	Resfriamento	Rede	
Inverno	(80 – 45) °C	(80 – 60) °C	-	Os modelos apresentam carga elétrica	1
Transição	(80 – 45) °C	(80 – 60) °C	(6 – 12) °C		2
Verão	(80 – 45) °C	-	(6 – 12) °C		3

Observações:

- 1 – Nesse modelo há duas fontes de carga de aquecimento provenientes do sistema de armazenamento de água quente;
- 2 – No modelo de transição são implementados o sistema de armazenamento de água fria e a torre de resfriamento e inserindo o chiller de absorção. Todas as cargas térmicas e elétricas são implementadas nesse modelo;
- 3 – O sistema de aquecimento 2 não é implementado nesse modelo.

Monitoramento e análise de dados foram realizados após o processo de comissionamento com suas múltiplas interfaces ao longo da execução do empreendimento de trigeração que levaram um período de três anos até 2011. Com a duração total de quatro anos até a obtenção de dados consistentes, o projeto obteve resultados esperados pelos autores de forma satisfatória.

Empregando uma tecnologia de processo de trigeração, o conceito de descentralização de sistemas energéticos com produção de energia renovável próximo a demanda exigida foi logrado com êxito na disseminação dessa tecnologia nas edificações.

A companhia EPC (*Engineering Procurement Construction*) instalou no ano de 1987 uma turbina a gás Ruston de 4MW e em parceria com a universidade Rice, instalaram uma planta de trigeração. Essa primeira planta de trigeração projetada alcançou objetivos mais do que esperados, segundo Medved (2011), no qual adicionaram uma nova planta de cinco MW, produzindo frio e calor, como a anterior.

Para Rocha e Garrido (2012), o sistema de trigeração é usado para produção de energia simultânea elétrica e térmica, na qual essa última, mediante fornecimento dos produtos de combustão para aquecimento na carga de refrigeração, recupera a energia térmica que iria ser impulsionada para a atmosfera. A combinação: refrigeração, calor e energia é uma tecnologia antiga que converte o conteúdo de energia nas ligações químicas do combustível numa trigeração. Dessa forma, a configuração de equipamentos disponíveis supre a demanda de uma única fonte primária de energia, propiciando vantagem na economia de energia e uso ambiental adequado dos combustíveis fósseis. Os sistemas de trigeração têm sido utilizados com vantagens nos últimos anos, em sistemas de geração de energia distribuída em função do crescimento da produção do gás natural, incentivos fiscais e políticas de regulação de energia.

Rocha e Garrido (2012) desenvolveram duas plantas de trigeração de pequena escala para serem testadas a operacionalidade e a avaliação da eficiência global. O primeiro sistema é baseado numa microturbina de 30 KW a gás natural, com o motor primário e um sistema comercial de refrigeração por absorção de água e amônia, para produção da água gelada e o calor da caldeira recuperado para produção de água quente. O segundo sistema de trigeração utiliza um motor de combustão interna alimentada por gás natural, que é acoplado a um gerador elétrico de 26 KW e outros dois sistemas de recuperação de calor já mencionados. Ambos os gases de escape foram encaminhados

para o sistema de refrigeração com 17,6 KW. Pode ser observado na figura 2.3 que o Fator de Utilização de Energia (FUE) atingiu 42,7% no motor de combustão interna.

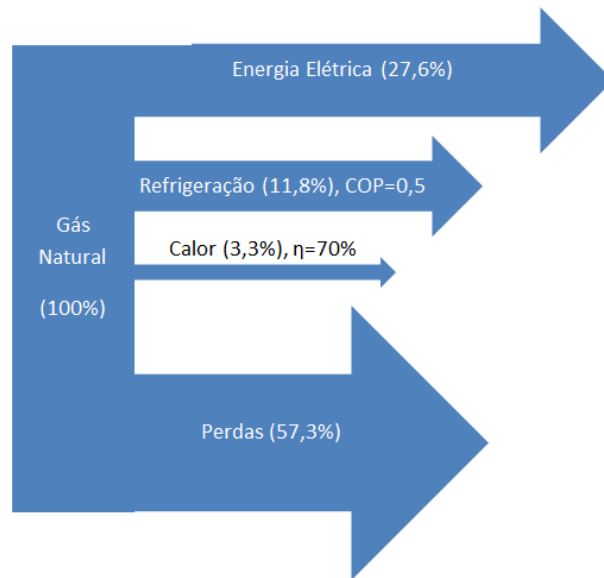


Figura 2.3 Diagrama de fluxo para o sistema de trigerção operando com motor de combustão interna

Ameri *et al.* (2010) estuda o desempenho de uma nova configuração de micro cogeração em turbina a gás num sistema de trigerção (sistema que produz calor, frio e eletricidade de forma integrada por fontes de queima de combustível), sendo um sistema de refrigeração a vapor de exaustão e um gerador de vapor num recuperador de calor. Um ciclo de uma microturbina a gás produz 200 KW de energia e gases de escape que são utilizados num Gerador Recuperador de Calor de Vapor (GRCV) que fornece fluxo de vapor no sistema de refrigeração para produzir frio no verão. No inverno, esta parte do vapor saturado é usada para aquecimento. Neste trabalho, os autores avaliaram o desempenho do sistema em relação ao Fator de Utilização de Energia, eficiência térmica, a relação da potência líquida de evaporação do refrigerador e a energia para aquecimento. Foi demonstrado que o sistema de cogeração usado chega a ter uma economia de combustível em 23% no verão até 33% no inverno, em comparação à produção separada de aquecimento, arrefecimento e eletricidade. A análise exergética do sistema também foi feita, sendo demonstrado que a câmara de combustão e o GRCV são reconhecidos como as maiores fontes de perdas de exergia respectivamente.

Para Deshpande *et al* (2010) os investimentos significativos em biocombustíveis em pesquisa e desenvolvimento, juntamente com novas plantas comerciais de energia e renováveis, reforçam o compromisso continuado da energia como disponibilidade

alternativa, apresentando segurança com redução nos impactos ambientais pela não utilização de combustíveis fósseis. Com o processo de transesterificação na produção de biodiesel derivados de triglicérides de origem animal e reações com álcool, os autores apontam que mais de 90% nos EUA são baseados no óleo da soja, e em relação ao mundo há diversas fontes. Estima-se que a produção de biodiesel propiciou a redução de emissões dos gases do efeito estufa em torno de 41%, proporcionando menos poluentes atmosféricos liberados por ganho líquido de energia.

Os autores desenvolveram uma tecnologia de fluido integrado a planta de cogeração na produção de combustíveis de biodiesel, sem separar a tecnologia convencional. Apresenta em seu projeto uma viabilidade técnica e econômica. O núcleo do sistema integrado consiste da transesterificação de várias fontes com metanol ou etanol. Parte dos produtos da reação é queimada pelo gerador de energia a diesel integrado ao sistema que fornece energia necessária para bombear o fluido e o calor dos gases de escape no processo de transesterificação. A figura 2.4 representa o esquema do projeto.

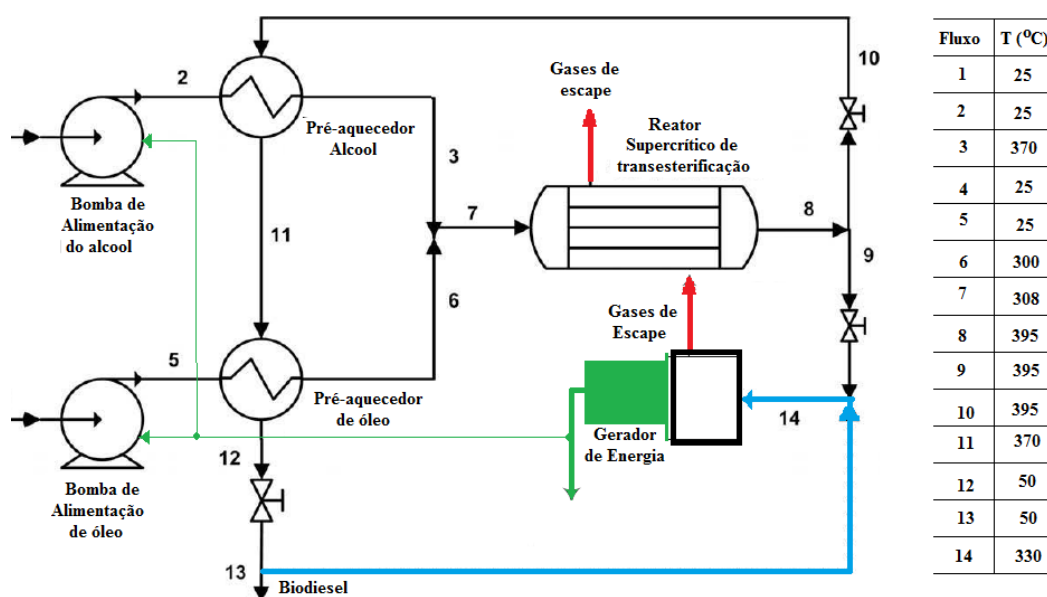


Figura 2.4 Esquema de produção de biodiesel no processo de transesterificação de óleo vegetal

Bicho, Catalão e Mendes (2009) afirmam que as mudanças climáticas e agressão ao meio ambiente são relacionadas com a demanda de energia existente atualmente nas formas de obtenção. Há uma relação do aumento do consumo de energia e o surgimento

ou aprimoramentos de fontes energéticas para suprir a demanda excessiva que acarreta o uso das matérias primas que degradarão o meio ambiente num futuro próximo.

Lai e Hui (2006) qualificam a trigeração como eficiente e ambientalmente desejável, como também mais adequada, na implantação de sistema de geração distribuída. A figura 2.5 apresenta diagrama esquemático de um sistema trigeração simplificado utilizado na produção. No sistema apresentado, a alimentação elétrica se faz tanto pelo sistema de trigeração, como também pela rede convencional, isso dá uma autonomia de funcionamento no período de demanda. Para a parte de calor e frio, o sistema de trigeração utiliza o vapor residual.

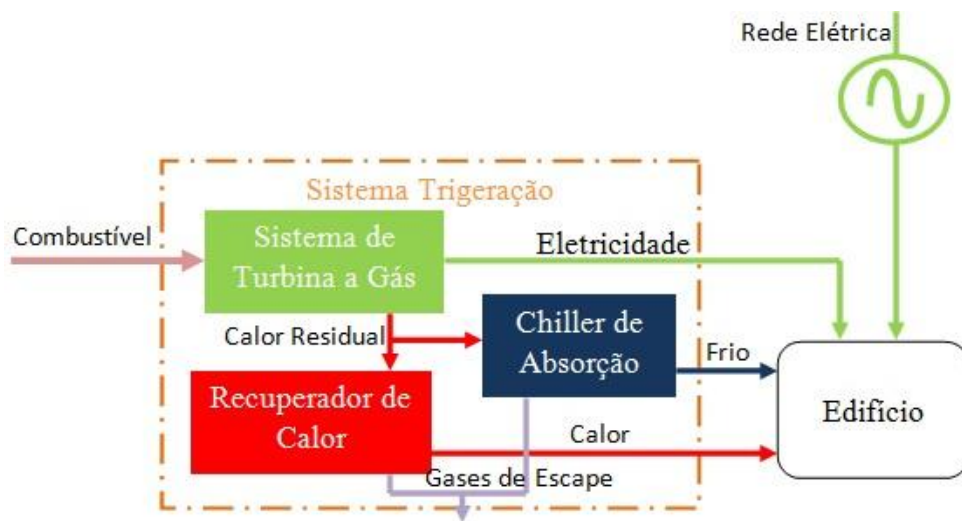


Figura 2.5 Diagrama esquemático do sistema trigeração simples alimentando uma edificação

Lozano *et al* (2009) afirma que a cogeração tem contribuído significativamente e tornando-se competitiva em relação ao custo efetivo de uma planta em setores da indústria. Partindo de um sistema com fonte primária a gás natural, a cogeração providencia calor e energia elétrica para comércio e residência. Com o reordenamento desse sistema, estende-se com o reaproveitamento do calor utilizado nos sistemas de refrigeração por absorção, no intuito de usar como complemento no aquecimento de cargas, formando assim um sistema de trigeração. Os autores propõem uma análise termodinâmica num sistema de trigeração simples avaliando três diferentes tipos de custo: custo marginal; preço do produto no mercado e; custo interno. O sistema consiste das seguintes unidades: módulo de cogeração (MC), Caldeira Auxiliar (CA) e dois sistemas de refrigeração, sendo um *chiller* de absorção (C_A) e um *chiller* de compressão (CC). Os coeficientes de eficiência de trabalho e calor do MC são

respectivamente 0,35 e 0,40, com uma potência nominal do sistema global MC de 350 kW. O rendimento da CA é de 80%, fornecendo uma capacidade nominal de 400 kW. Para ambos os sistemas de refrigeração, a potência fornecida é de 250 kW com um COP de 0,625 para o C_A e de 5,0 para o CC.

Nascimento *et al* (2009) aproveitou estudos de Nagaoka e Esperancini (2006) e analisou também a viabilidade econômica da cogeração de energia usando a metodologia *system dynamics*. Os autores concluíram que uma usina de cogeração requer investimentos altos e os resultados positivos são obtidos em longo prazo. Portanto, investimentos de recursos de terceiros são mais vantajosos economicamente por apresentar pagamentos de empréstimos em longo prazo e parte destes, subsidiados.

Nagaoka e Esperancini (2006), em artigo publicado, desenvolveram um algoritmo de Redes Neurais Artificiais e aplicaram o método num estudo de caso de cogeração de energia elétrica. A usina sucroalcooleira, localizada na região oeste do estado de São Paulo, produz energia para autoconsumo e o excedente vendido foi a escolhida. Os resultados obtidos testaram a convergência com resultados oriundos das análises de riscos reais, na determinação de indicadores de viabilidade econômica de investimentos. Constatou-se que, esses investimentos na área de cogeração são menores do que outras fontes geradoras, como por exemplo, a geração hidroelétrica. A época, estimativas de tomadas de decisões da iniciativa privada, em projetos de cogeração por variáveis de interferência na viabilidade de investimentos, propiciavam decisões, não diferenciando da realidade de hoje. Entre os custos fixos com a cogeração, estão o de mão-de-obra, manutenção dos equipamentos e o insumo.

2.2 SISTEMAS DE ALTO DESEMPENHO NA COGERAÇÃO

Segundo Chorlely e Kennedy (1971), sistema é o conjunto de objetos e/ou atributos estruturados, formados por componentes ou fenômenos que apresentam magnitudes variáveis, exibindo relações discerníveis um com os outros além de operar como um todo complexo.

O modelo em estudo é caracterizado de modo bem subjetivo, onde não incluem todas as observações ou medidas associadas, porém, permite mostrar fenômenos e não detalhar situações acidentais. Esse modelo estabelece grau de conhecimento sobre as partes componentes, interações entre os elementos e

funcionamento interativo entre as entradas e saídas. A nuance dos arranjos construídos consideram a estrutura e o funcionamento com base nos dados de entrada e saída, retroalimentação e continuidade de operação (evolução), fundamentada nos ensaios realizados a serem desenvolvidos.

Na visão de Karl Popper, a fundamentação do conhecimento científico não consiste em realizar pesquisas e experimentos no intuito de ratificar o enunciado (ou hipótese), porém cria condições passíveis de refutá-las. Os exercícios repetitivos não aumentam a validade e o conteúdo de enunciados, ganhando consistência apenas quando submetidos a condições diferentes (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O modelo global de um sistema consiste em um fluxograma sendo avaliados por alimentação e retroalimentação. A figura 2.6 generaliza um fluxograma que apresenta possíveis processos de modelagem.

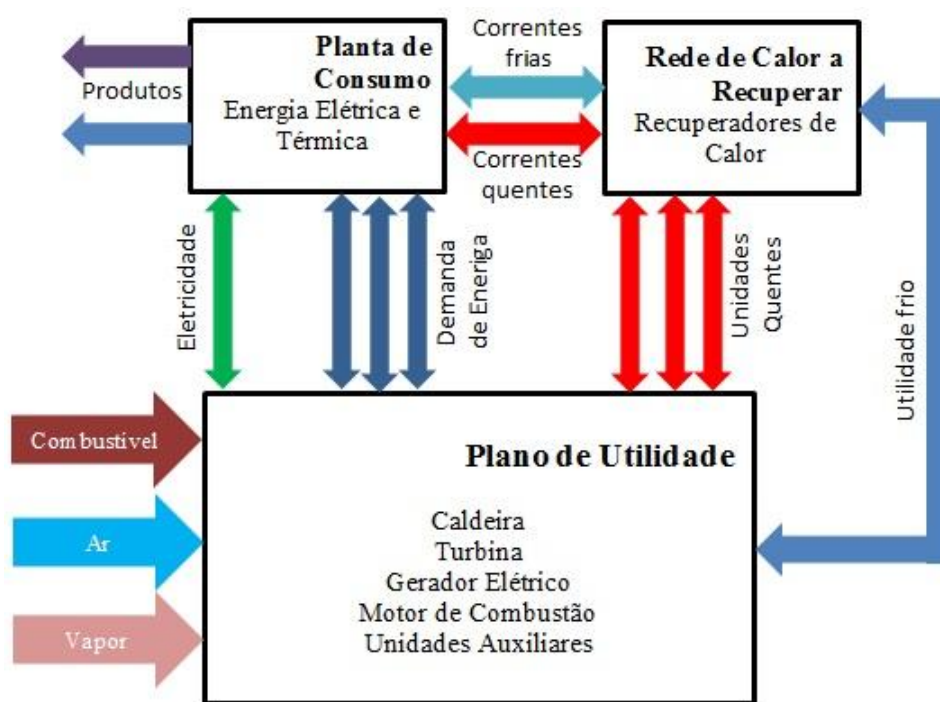


Figura 2.6 Estrutura de fluxograma de um modelo de alto desempenho

O modelo desenvolvido na tese procura acrescentar condições diferenciadas de outros sistemas de cogeração, para que possa ser explorado melhor seu alto desempenho. O SAD tem dois principais subsistemas em sua planta global. O primeiro equivale a uma usina de biodiesel que produz biodiesel a partir do óleo vegetal e o segundo é a unidade de refrigeração por absorção de simples efeito operando no ciclo

GAX (*Generator Absorber-heat eXchanger*) com a utilização de mistura binária Amônia – Água ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$).

As análises dos *outputs* do modelo construído são trabalhadas e sumarizadas para que se possam realizar as discussões. Os resultados são estabelecidos nos parâmetros de entrada/saída e condições internas do sistema e propiciam a adequação das respostas a que tem pretensão.

2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

É notório saber que as variáveis: crescimento econômico e consumo de energia, se condicionam mutuamente na dinâmica do desenvolvimento de um país. Portanto, a disponibilidade de energia, principalmente na área industrial, que é a base da produção do País, acarreta mais desenvolvimento e exige maior oferta de energia.

Segundo Victor Hugo Klagsbrunn do Grupo de Estudos do Setor Elétrico da UFRJ, o Brasil se beneficiou da maior parte do seu potencial hidroelétrico nas bacias dos rios Paraná, Uruguai, São Francisco e Bacia Amazônica (CASTRO, 2011). O potencial da Bacia Amazônica a ser utilizado no Brasil, também é vislumbrado por empreendimentos de interesse dos países limítrofes, como Peru, Bolívia, Colômbia e Venezuela. Isso propiciará, num futuro próximo, que o país se apresente como possível grande consumidor dessa energia, gerada por conta da integração que deverá surgir em acordos comerciais bilaterais, a exemplo da Usina de Itaipu (central hidroelétrica binacional Brasil-Paraguai).

No entanto, o consumo de parte da energia gerada com esses outros países pelo Brasil tem caráter transitório, já que é previsível o uso da energia de cada país por esperar que também necessitassem da energia decorrente do desenvolvimento próprio.

Nesse caso, a expectativa de uso da energia por hidroelétricas também é um fator limitado por conta da dependência do aumento de capacidade gerada nesse setor.

Fatores como fonte renovável limpa e custos menores de geração favorecem o Brasil por, apresentar um sistema de grande porte hídrico em termos mundiais, porém, o modelo propicia incertezas ao ciclo de chuvas anuais, que no período de dezembro a abril é de estação úmida e nos demais meses de estação seca. A capacidade de armazenamento (EAR), que se encontra em sua maior parte no sudeste, é a energia

potencial da água dos reservatórios que são estocadas durante o período úmido para que no período seco apresente estabilidade na geração de energia elétrica (CASTRO, 2011).

Mesmo com aumento das construções de usinas a fio d'água, a utilização da EAR é comprometida por conta desse novo modelo de usina no país. No período úmido há dificuldade de acúmulo de energia excedente, e no período seco, não poderá ter água suficiente para geração.

A problemática de regularização da disponibilidade energética, principalmente da necessidade de geração de energia em que o país está passando na área setor hídrica, força o país e setores que necessitam de energia a procurarem uma diversificação da fonte geradora.

Nivalde J. de Castro *et al* no artigo “Considerações sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro” publicado no V Seminário Internacional do Setor de Energia Elétrica, organizado por Castro (2011), afirmam que a diversificação está sendo feita por geração térmica em usinas abastecidas a gás natural e óleo combustível.

Há dois tipos de usinas térmicas que dividem o parque térmico brasileiro classificado em inflexíveis e flexíveis. O primeiro tipo de usina térmica opera de forma contínua e o segundo opera através da ação do operador do sistema para suprir a demanda, evitando assim o risco de desabastecimento energético.

2.3.1 Energia

Segundo Gómes-Expósito, Conejo e Cañizares (2009) “energia é um ingrediente fundamental na sociedade moderna”, pois, tem impacto diretamente no desenvolvimento socioeconômico das nações. Leite (2013) argumenta que a eletricidade está crescendo de forma ascendente e vertiginosa em relação à população.

No Brasil, Bermann (2002) sugere que o país deve propiciar o aumento do padrão de vida dos brasileiros através do aumento do consumo energético e, ao mesmo tempo, diminuir a quantidade energética convertida em bens e serviços.

No gráfico da figura 2.7, Gómes-Expósito, Conejo e Cañizares (2009) fundamentam os argumentos de Leite (2013) mostrando a curva do desenvolvimento ao longo dos anos nos países. O indicador no consumo de eletricidade se alinha de forma

paralela ao produto interno bruto (PIB) com outros indicadores básicos, como população e seu consumo primário (de bens e serviços).

O desenvolvimento sustentável com o crescimento da demanda energética não entra em sintonia. Infelizmente, o favorecimento à produção de energia não favorece o meio ambiente, ocasionando degradações ambientais que refletem na vida do planeta.

Acerca disso, Miller (2007) afirma:

A transição para um futuro mais sustentável no campo energético depende primordialmente dos cidadãos, que devem insistir para que as autoridades eleitas e as empresas implementem políticas para tal mudança (Miller, 2007, p. 323).

O desafio de reduzir os impactos ambientais por uso dos combustíveis fósseis é encontrar formas de redução da poluição do ar e emissões dos gases à medida que alternativas menos prejudiciais sejam inseridas com melhoria da eficiência energética.

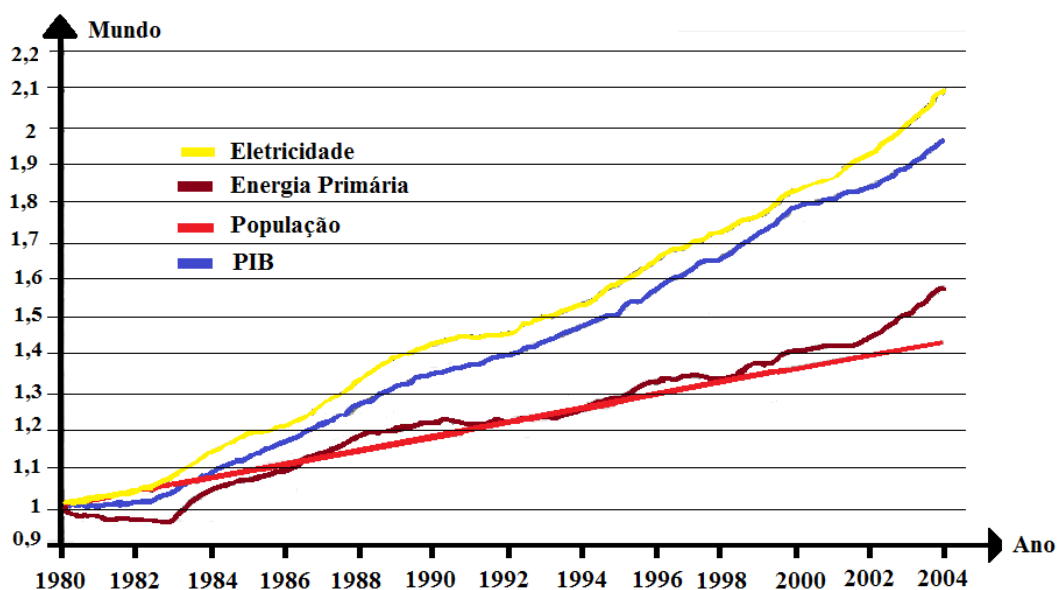


Figura 2.7 Taxa de crescimento referente aos anos de 1980 até 2004 (adaptado)

Nos últimos anos, as inovações no setor de energia estão ocorrendo de modo diferenciado da evolução baseada na abundância dos recursos. Novas políticas de geração, distribuição e reaproveitamento de energia são diretrizes que ganham força na racionalização da energia. Esta evolução surge em resposta às novas tendências

econômicas e ambientais, como a liberação da comercialização de energia, a participação de novos agentes no processo produtivo e mercadológico, e o desenvolvimento de tecnologias que atendam a requisitos de eficiência e racionalização dos processos.

Os avanços tecnológicos associados à introdução de produtores independentes, com possibilidade de comercialização dos excedentes da energia gerada à rede, aumentam a competitividade no setor e a diversificação dos processos produtivos, no lado da geração.

O Brasil encontra-se no bloco de países emergentes em desenvolvimento e apresenta crescimento industrial desordenado segundo Mello Jr (2006). Por esse fator talvez, o desempenho na cogeração não é elevado.

Contrário ao desempenho do Brasil, Poole, Hollanda e Tolmasquim (1995) em seu artigo, cita uma experiência de produtores independentes de eletricidade que ocorreu nos EUA no ano de 1978. A partir de uma lei criada, que estimulava a independência do uso de combustíveis fósseis, houve um incentivo a eficiência energética com implementações, por exemplo, de cogeração.

2.3.2 Geração Distribuída

A implantação da geração distribuída é relativamente nova no setor da eletricidade. Nas pesquisas literárias referentes à área, não se encontra consenso acerca da definição própria da geração distribuída, existindo grande número de termos e definições que são usados para defini-la. Nos países anglo-americanos (EUA e Inglaterra), o termo usado frequentemente é: “produção integrada”, enquanto que na América do Norte o termo é: “geração dispersa”.

Em relação à classificação de unidades de energia de geração distribuída, o *Electric Power Research Institute* define geração distribuída como geração próxima de 50 MW. Para o *Gas Research Institute*, geração distribuída compreende uma potência entre 25 KW a 25 MW e a *Preston and Rastler* define a capacidade como em torno de alguns kW a pouco mais de 100 MW (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2001).

Lora e Nascimento (2004) afirmam que desenvolvimentos em tecnologias de geração termelétrica em pequena escala, desde motores alternativos até células

combustíveis credenciam credibilidade a geração distribuída, como alternativa de suprimento de energia elétrica, efetuando-se geração nos pontos de consumo final ou próximo deles, principalmente quando é de interesse a implantação de sistemas de cogeração. Eles definem geração distribuída como pequenas unidades de geração, menores que 25MW e instaladas próximos a carga, como também geração independente de eletricidade móvel para pequenas fontes de energia de 45 kW a 200 kW.

O grande interesse nesse tipo de geração de energia é a implementação de novas tecnologias que apresentam reais mudanças na estrutura de geração térmica e elétrica, atuando como tecnologias disruptivas. Para Wright, Carvalho e Spers (2009), as tecnologias disruptivas como pesquisa causam um rápido avanço na capacidade de um produto ou tecnologia, fornecendo base para um modelo inovador competitivo num determinado setor. Essas tecnologias implementadas a atender cargas locais, de modo geral, não podem ser facilmente avaliadas por uma empresa dominante, como as concessionárias. Isso porque, perfis de consumo distintos, o que força de modo natural, consumidores e produtores a se incorporar.

Para Bower e Christensen (1995), a descoberta pelos consumidores ou incorporados por agentes de mercado, podem provocar alterações nas características do setor.

Com a reestruturação do setor elétrico no Brasil, a geração distribuída a partir da década de 90 tornou-se interessante e o crescimento de incentivos a participação privada, mesmo com restrições legais e às exigências para a certificação dos sistemas para a participação do mercado de energia. A regulamentação da geração distribuída no Brasil encontra-se no anexo A.

Os motores de combustão interna constituem a tecnologia para geração distribuída como maior aplicabilidade. Outras tecnologias como turbinas a gás ou células a combustíveis (CaC) também são tecnologias na geração distribuída. A tabela 2.2 fornece dados comparativos das diferentes tecnologias.

A utilização do sistema de geração distribuída inclui apenas a eletricidade para situações remotas em que o acesso a redes de distribuição não são viáveis economicamente e o uso de sistemas de cogeração para usuários não só de eletricidade.

Segundo os autores Ackermann, Andersson e Söder (2001), questões técnicas relacionadas com a geração distribuída, podem variar significativamente com a classificação.

Tabela 2.2 Tecnologias de Máquinas Primárias para a Geração

Tecnologia	Motor Diesel	Motor <i>Otto</i>	Turbina a gás	CaC
Estágio	Comercial	Comercial	Comercial	1996 - 2010
Potência (kW)	20-10000 ¹	50-5000+	1000+	50-1000+
Eficiência % (PCS ²)	36-43	28-42	21-40	35-54

Adaptado de Lora (2004).

Portanto, é adequado introduzir categorias de geração distribuída. A tabela 2.3 apresenta categorias de geração distribuída por níveis de potência gerada. A potência gerada apresenta limites máximos e mínimos e com implementações específicas. Em potências menores, a implementação de sistemas de cogeração são para fins de aquecimento (EL-KHATTAM e SALAMA, 2004).

Tabela 2.3 Divisão de Capacidade de Geração Distribuída

Categoria	Potência (W)
Micro	1 – 5k
Pequena	5k – 5M
Média	5M – 50M
Grande	50M – 300M

2.4 GÁS NATURAL

O desenvolvimento na economia brasileira, como em todo o mundo, é centralizado na geração de eletricidade com características de “monopólio natural” nos grandes centros de geração de energia elétrica (predominantemente hidroelétrica no Brasil). O gás natural propicia uma quebra da centralização dessa energia elétrica, tornando possível a redução da escala dessa geração e propiciando pequenas centrais de geração descentralizadas, criando independências das grandes centrais de geração centralizada que estão, muitas vezes, distantes do consumidor final.

¹ O sinal de + significa: ou maiores.

² PCS: Poder Calorífico Superior

Na década de 90, com um quadro desfavorável ao uso do gás natural na matriz energética brasileira, foram construídos gasodutos a níveis nacionais e internacionais, como por exemplo, o gasoduto Bolívia-Brasil. Nos estados brasileiros, onde existem companhias estaduais de rede própria de gás, são apresentados gasodutos em boa parte do litoral, conforme mostra a figura 2.8.

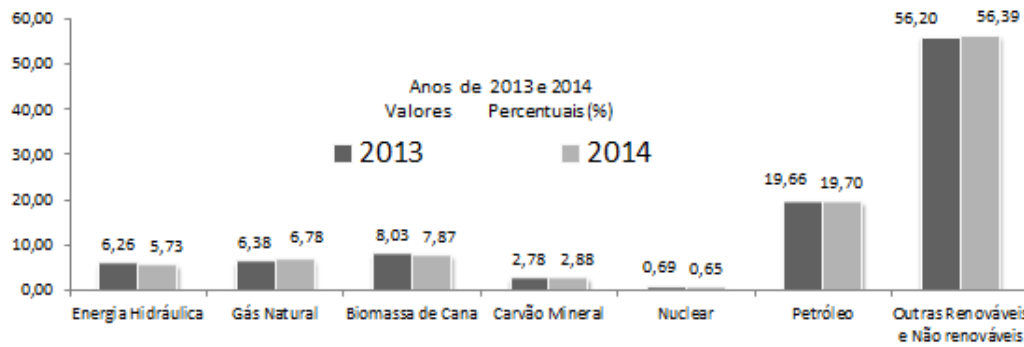


Fonte: PETROBRÁS/2014

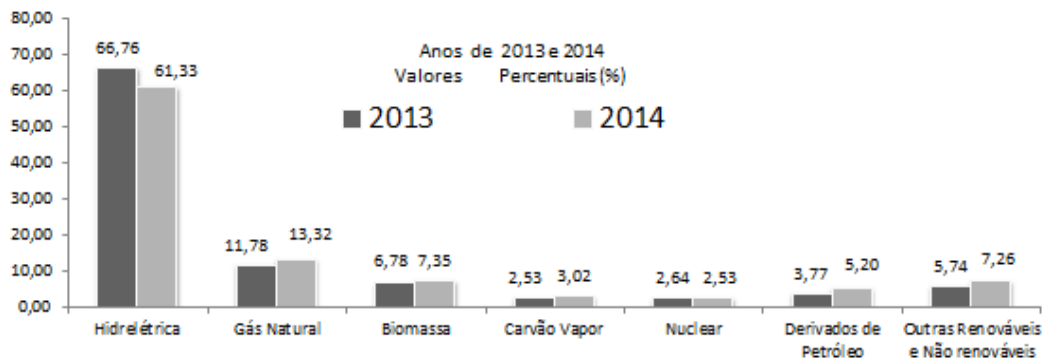
Figura 2.8 Gasodutos distribuídos no território brasileiro e na Bolívia

Portanto, a produção e a oferta do gás natural tendem só a crescer. O gráfico da figura 2.9 mostra o crescimento da produção e o uso do gás natural para a geração de energia elétrica nos dois últimos anos. Vale salientar que nos anos anteriores aos apresentados, houve uma tendência crescente nesse tipo de fonte energética.

No mundo, o gás natural é o terceiro mais usado, ficando atrás apenas do carvão e derivados de petróleo. Um exemplo dessa posição é que um estudo da *Key World Energy Statistics* publicado pela *International Energy Agency* (IEA) no ano de 2008 mostra o crescimento da produção entre 1973 e 2007 que passou de 1,227 Mm³ para 3,031 Mm³. No entanto, saltou da quarta para a segunda colocação no *ranking* dentre as principais fontes produtoras de energia elétrica. A tabela 2.4 mostra valores relacionados às principais fontes de produção e geração de energia elétrica.



(a) Oferta de produção de energia



(b) Oferta de geração de energia elétrica

Fonte: Relatório Base 2014 (BEN, 2015)

Figura 2.9 Participação do gás natural na produção de energia e no setor de geração de eletricidade (Brasil).

O gás natural produzido possui frações condensáveis que podem formar bolsões de líquidos nos gasodutos e ocasionar danos ao consumidor final. Para isso, são processados em Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN) nas próprias instalações de produção e retirado os condensados. Estes condensados são constituídos por GLP, nafta leve e água (GARCIA, 2002). Há também a obtenção de gás natural “seco”, também denominado gás residual, composto de metano (em sua maior parte) e etano na saída da UPGN. Esse gás seco pode ser usado para geração de eletricidade, calor, frio e na área automotiva.

Entre as vantagens do gás natural seco, em relação a outros fósseis como o carvão e o petróleo, está o fato de não gerar impactos ambientais como os citados, usado de forma direta pelo consumidor industrial e, portanto, resulta numa produção com custo inferior aos demais, que envolvem etapas de transformação físico químicas mais complexas.

Entre as vantagens dos fósseis carvão e petróleo, por exemplo, eles se beneficiam da produção e transporte já existentes. O custo reduzido de produção e o seus derivados poderão ser armazenados em botijões, tanques, barris, que permitem atender a qualquer demanda (CECCHI, 2001).

Em sua vasta aplicação, o gás natural pode ser utilizado como combustível na geração exclusiva de eletricidade por meio de usina termoeletrica e como produção de vapor, calor e eletricidade combinados, denominado cogeração os SAD.

Na escolha do combustível a ser injetado na câmara de combustão no fim do tempo de compressão ou durante a expansão (BRUNETTI, 2012), seguem um ou mais critérios:

- Disponibilidade, incluindo a confiabilidade do abastecimento;
- Conveniência de uso e armazenamento;
- Economia e;
- Facilidade de controle.

A reação da combustão completa estequiométrica produzida no escapamento é decorrente da qualidade da mistura. Infelizmente, fatores do percentual da mistura com o ar e a temperatura de chama não asseguram uma boa combustão e, portanto, produtos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente surgem a partir dessa combustão que promove o aumento da formação de NOx e material particulado.

Já são notórios os efeitos do aquecimento global relacionados com mudanças climáticas, motivos de preocupação no mundo todo. A análise da eficiência energética contribui para melhorar os índices de redução das emissões de gases como o dióxido de carbono. Essas emissões, nos seres humanos, afetam de forma negativa em relação à saúde decorrente, entre outros gases, os materiais particulados.

2.4.1 Extração do Gás Natural

A composição do gás natural é de 80% a 90% de metano, com 5% a 10% de etano e o restante de gases em proporções menores, incluindo as famílias hidrocarbonetos, nitrogênio e gases raros (GARCIA, 2002).

O gás natural ao ser extraído nas suas reservas brasileiras é constituído de porções contaminantes que passam por tratamento para a retirada. O gás sulfídrico

(H₂S) é um gás, com odor de ovos podres e carne em decomposição e é retirado por tratamento em unidades de dessulfuração.

A portaria nº 104, de 8 de julho de 2002 e revogado na resolução nº 16 de 17 de junho de 2008 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) em seu artigo 11, normatiza a odorização do gás natural detectável ao olfato humano, quando de vazamento e a condição quando não há necessidade dessa odorização.

Art. 11. O gás natural deverá ser odorizado na distribuição de forma que seja detectável ao olfato humano seu vazamento quando sua concentração na atmosfera atingir 20% do limite inferior de inflamabilidade.

Parágrafo Único: A dispensa de odorização do gás natural em dutos de distribuição dedicados cujo destino não recomende a utilização de odorante e passe somente por área não urbanizada deve ser solicitada ao órgão estadual com jurisdição na área para sua análise e autorização.

Tabela 2.4 Produção e uso da energia no mundo (adaptado)

País	Produção				Uso da Energia				Aumento (%)
	Total		Per capita		Combustível – Energia total (%)				1990-2011
	Óleo (t)		Óleo (Kg)		Fóssil		Renováveis e resíduos		
	1990	2011	1990	2011	1990	2011	1990	2011	
Brasil	104,1	249,2	0,937	1,371	51.2	54.6	34.1	28.9	3.1
Canada	273,7	409	7,505	7,333	74.6	73.5	3.9	4.9	1.1
China	880,8	2432,5	7,670	2,029	75.7	88.3	23.0	7.9	5.8
Franca	111,9	136,1	3835	3,868	58.2	48.6	4.9	5.6	0.7
Alemanha	186,2	124,1	4,421	3,811	86.8	79.8	1.4	8.5	-0.3
India	291,8	540,9	365	614	55.4	72.3	42.1	24.7	4.0
Japão	75,2	51,7	3,556	3,61	84.5	89.6	1.1	2.3	0.4
Russia	1293,1	1314,9	5,929	5,113	93.4	91.0	1.4	1.0	-0.6
Inglaterra	208,1	129,5	3,597	2,973	90.7	85.8	0.3	3.3	-0.3
EUA	1652,5	1784,8	7,672	7,032	86.4	83.7	3.3	4.2	0.8
Mundo	8823,7	13157,5	1,665	1,89	81.0	81.5	10.2	9.8	2.0

Produção e utilização de energia

Última data atualizada: 09 de abril de 2014.

Portanto, o gás natural encontrado na natureza é uma mistura variada de hidrocarboneto gasoso, podendo ocorrer de forma associado ou dissociado do petróleo. Para os gases associados, há grande teor de gás metano e para os não associados, proporções mais significativas de etano, propano, butano e hidrocarbonetos mais pesados. A presença e proporcionalidade dos elementos constituintes do gás natural dependem da localidade (mar ou terra), forma associado ou não, geologia do solo e tipo de rocha (GasNet, 2013).

2.4.2 Propriedades do Gás Natural

A constituição do gás natural é maior percentualmente de metano, possuindo menores porcentagens de etano e propano, e possui alto poder calorífico. Os principais componentes do gás natural estão apresentados na tabela 2.5. Essa composição é obtida pela análise cromatográfica que se baseia no princípio da diferença de velocidade da migração de componentes por meio de poros.

Tabela 2.5 Percentual da massa dos elementos constituintes do gás natural

Características	Unidade	Regiões brasileiras		
		Norte	Nordeste	Demais regiões
PCS ³	1000xkJ/m ³	34 a 38	35 a 42	
Metano, min.	% vol.	68,0	86,0	
Etano, max.	% vol.	12,0	10,0	
Propano, max.	% vol.	3,0		
Butano	% vol.	1,5		
Oxigênio	% vol.	0,8	0,5	
(N ₂ + CO ₂), max.	% vol.	18,0	5,0	4,0
Nitrogênio	% vol.	-	2,0	
Enxofre total, max.	mg/m ³	70		
Gás sulfídrico (H ₂ S)	mg/m ³	10,0	15,0	10,0

Fonte: Portaria ANP Nº 104, de 8.7.2002 - DOU 9.7.2002

³ Poder Calorífico Superior (PCS), estabelecidos com referência as condições de temperatura (293,15 K), pressão equivalentes (kPa) e base seca.

A composição qualitativa e quantitativa do gás depende dos fatores envolvidos no processo de produção, coleta, condicionamento e escoamento.

Iniciando suas operações em 1995 na distribuição de gás canalizado no Estado da Paraíba conforme lei estadual 9493/94, a PBGÁS, fundada em 1994, é a empresa de economia mista responsável pela distribuição no mercado. O gás natural distribuído é extraído dos campos de produção dos estados do Rio Grande do Norte, Bahia, Sergipe, Alagoas e região sudeste.

A composição média do gás natural referente ao Estado da Paraíba está mostrada na tabela 2.6.

Tabela 2.6 Composição média do gás natural da PBGÁS

Elemento	% Vol.
Metano	90,09
Etano	6,84
Dióxido de Carbono	1,56
Nitrogênio	1,35
Propano	0,16

Fonte: PBGÁS / 2015

As características do gás natural são três: inodoro; incolor e inflamável. No processo de distribuição ao consumidor final, por medida de segurança, é obrigatória a adição de compostos à base de enxofre, em concentrações necessárias à caracterização de um cheiro marcante, porém sem características corrosivas. O processo é conhecido como odorização. A tabela 2.7 apresenta algumas propriedades do gás natural.

Tabela 2.7 Valores Médios da Propriedade do Gás Natural da PBGÁS

Propriedade (valores médios)	
PCS (kcal/m ³)	9100
Densidade relativa do ar	0,614
Massa específica (kg/m ³)	0,737

Fonte: PBGÁS / 2015

O gás natural utiliza como insumo, quatro formas que podem funcionar como alimentação direta no uso da combustão e geração de potência. Esses quatro tipos de insumo indicam que ele é:

- Utilizado como combustível para o atendimento térmico direto aos segmentos residencial, comercial e industrial; para geração de potência de acionamento em termelétricas e em processos industriais; bem como carburante para o transporte;
- O gás natural é usado como redutor siderúrgico no processamento de minérios;
- Utilizado como matéria-prima básica de processos de produção de combustíveis sintéticos como gasolina, nafta, querosene, gasóleo, óleos lubrificantes, óleo Diesel, parafina, dentre outros;
- Identificado pela produção de gasoquímicos, base da indústria moderna, em que os investimentos são elevados e o insumo gás natural bastante valorizado, ou seja, os gasoquímicos são determinados pela produção de petroquímicos a partir do gás natural e diferenciado da produção tradicional, na qual são identificados derivados do petróleo através do insumo básico, além de oferecer inúmeras vantagens, em particular a redução expressiva de impactos ambientais.

Os produtos são os mesmos: eteno, propeno, buteno, polímeros (polietileno e polipropileno), matéria prima na fabricação de fibras sintéticas, borrachas sintéticas, plásticos, revestimentos, química automotiva, produtos nitrogenados, detergentes e outros.

2.4.3 Poder Calorífico do Gás Natural

O poder calorífico de um combustível é um valor positivo da entalpia da combustão e pode ser definido como uma quantidade de energia liberada durante a combustão da massa de 1kg do combustível e que depende (entalpia) da composição química do combustível. Há duas classificações para esse tipo de poder calorífico. O primeiro é o Poder Calorífico Superior (PCS) obtido quando a água formada na combustão está no estado líquido e o segundo é o Poder Calorífico Inferior (PCI) obtido quando a água formada na combustão está no estado de vapor. A energia necessária (poder calorífico) para evaporar o líquido no PCS é a diferença entre os dois tipos de poderes caloríficos (MORAN *et al*, 2014), como mostra a equação 2.1:

$$PCS - PCI = (mh_v)_{H_2O} \quad (2.1)$$

onde m é a massa da água do produto da combustão por unidade de massa do combustível, e h_v é a entalpia de vaporização da água na temperatura especificada (ÇENGEL e BOLES, 2006).

As temperaturas dos gases do MCI são superiores as temperaturas de condensação do vapor da água e a recuperação desse calor não tem como ser recuperado.

A combustão de um combustível pode ser completa ou incompleta. A combustão completa se dá quando o percentual de oxigênio do ar tem quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos do combustível podendo ser classificada como mistura rica.

A fórmula química geral de um componente do combustível gasoso pode ser reseresentado por $C_nH_mO_r$. Os parâmetros n , m e r são valores numéricos. Segundo Vlasov (2008), os combustíveis gasosos podem ter gases incombustíveis, como por exemplo, o nitrogênio N_2 . Para um composto gasoso, a reação química do combustível gasoso está apresentada na equação 2.2.

$$\sum C_nH_mO_r + CO_2 + H_2S + N_2 = 1 \quad (2.2)$$

Vlasov (2008) apresenta uma fórmula para o cálculo do PCI dado por:

$$PCI_{GN} = \sum ((C_nH_mO_r)_i \cdot (PCI_{GN})_i) [KJ/m^3] \quad (2.3)$$

onde $(C_nH_mO_r)_i$ é a parte volumétrica do i -jésimo componente e $(PCI_{GN})_i$ é o PCI do componente.

Conhecendo os poderes caloríficos de hidrocarbonetos constituintes do combustível gasoso, Vlasov (2008) reformula a equação 2.2 obtendo coeficientes numéricos dos PCIs dos compostos e dividindo por cem as respectivas substâncias, obtém uma fórmula geral para o cálculo do PCI do gás natural.

$$PCI_{GN} = 108H_2 + 126CO + 234H_2S + 358.CH_4 + 591 \cdot C_2H_4 + 638.C_2H_6 + 860.C_3H_8 + 913C_3H_8 + 1187.C_4H_{10} + 1461C_3H_{12} + 1403C_6H_6 \quad (2.4)$$

onde os compostos químicos são em percentuais (%).

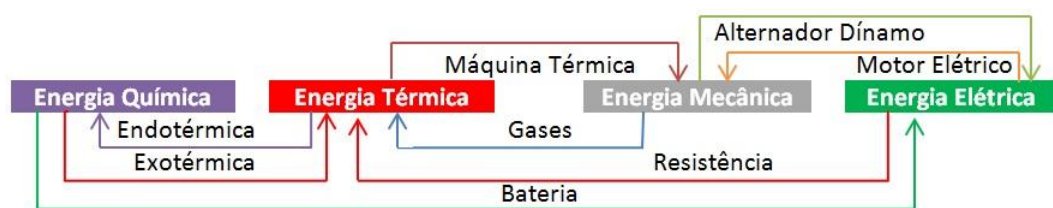
A partir dos dados da tabela 2.5 que apresenta os percentuais do gás na Paraíba, o valor obtido para o PCI é dado por $PCI_{GN} = 36617,62 \text{ kJ/m}^3$.

Para o valor atribuído ao PCS do gás natural na tabela 2.6 pela PBGÁS, é possível encontrar o valor do PCI pela equação 2.1. Para a temperatura a 100°C , o valor de h_{lv} (entalpia de líquido vapor) obtido na tabela B.1 no anexo B é de 2257 kJ/kg . A conversão para a unidade kJ/m^3 é dada pela relação h_{lv}/v onde v é o volume específico obtido na tabela B.1 mencionada. Substituindo esses valores na relação, o valor do poder calorífico é dado por $1349,07 \text{ kJ/m}^3$.

Transformado a unidade do PCS da tabela 2.6 para kJ/m^3 e substituindo na equação 2.1, o valor encontrado para o PCI da PPGÁS é de 36734 kJ/m^3 . Esse valor é bem próximo ao determinado pela equação 2.4.

2.5. ESTRUTURA DA PLANTA DE COGERAÇÃO

A dependência da energia em suas várias formas e os avanços tecnológicos, segundo (NEVES,2009), tendem a interagir entre ambas, tornando imprescindível o conhecimento do todo e não mais por partes determinando uso racional e eficiente desse conjunto. A figura 2.10 representa as possíveis interconversões de energia que podem ser reestruturadas e aproveitadas.



Fonte: PROCEL/2006 (adaptado)

Figura 2.10 Conversões de várias energias

A tecnologia de cogeração é composta por um número de componentes individuais, motor primário (térmico), gerador (elétrico), recuperador de calor e interligação elétrica, configurados em um todo integrado. O tipo de equipamento que aciona o sistema global (ou seja, o motor primário) geralmente identifica o sistema de cogeração. A importância do uso da cogeração torna-se evidente pela eficiência

energética que se obtém e pela conservação dos fatores ambientais. Na tabela 2.8 são apresentadas algumas diferenças de alguns sistemas de cogeração (SILVA, 2012). As especificações técnicas do grupo motor de combustão interna acoplado num gerador elétrico implementados nesse trabalho são mostrados na tabela 2.9.

Tabela 2.8 Características de alguns Sistemas de Cogeração

Parâmetro	Turbina a gás	Motor de combustão interna	CaC
Potência (MWe)	0,2 - 100	0,015 – 30	0,01 – 0,25
Calor / Eletricidade	1,12 - 2	0,4 – 1,7	1,1
$\eta_{\text{elétrico}}$ (%)	15 - 35	25 – 45	35 – 40
$\eta_{\text{térmico}}$ (%)	40 - 59	40 – 60	20 – 50
η_{total} (%)	60 - 85	70 – 85	55 - 90
Tempo de vida (anos)	15 – 25	10 – 20	>5
Carga mínima (%)	75	50	
Eficiência (%)	90 – 99	92 – 97	>95
Combustível	Gasoso, líquido	Gás, gasolina, gasóleo	Gás

Tabela 2.9 Grupo motor gerador da Leon Heimer S/A

Motor de Combustão Interna – Ciclo <i>Otto</i>	
Modelo: GEHGM-100 gás natural – 8,1 l	
Potência: 80 KW (100 KVA)	
Rotação: 1800 rpm	
Taxa de compressão: 9,1:1	
Potência: 240 HP a 3000 RPM	
Motor de partida 12 V / alternador 12 V	

Modelo BRUSHLESS⁴

Questões ambientais provavelmente serão cada vez mais importantes no futuro, na medida em que é crescente a preocupação com a qualidade e com os padrões do ambiente global e regional, incluindo a ameaça potencial da mudança climática, que se torna crescente e séria. A produção e o uso da eletricidade é geralmente uma das maiores fontes de emissões ambientais, tanto globais como locais.

⁴ Modelo de motor sem escovas com regulador eletrônico de tensão.

2.5.1 Motor de Combustão Interna

Os motores de combustão interna foram uma das primeiras tecnologias que usaram combustíveis fósseis na geração de eletricidade e podem ser usados na geração distribuída. Como aplicações diretas nas residências e indústrias com valores que vão de 5 kW a 10MW e eficiência de 25% a 45% (GOSWAMI, KREITH, 2007). Eles são classificados em rápidos, médios e lentos de acordo com sua velocidade nominal de operação.

O MCI estudado trabalha num rotação fixa de 1800 rpm e segundo Brunetti (2012) é classificado como um motor rápido, já que tem uma rotação superior a 1500 rpm. O objetivo principal do melhoramento nos motores de combustão interna é a redução de combustível por conta do efeito econômico que isso traz para o consumidor e a redução nas emissões de gases poluentes.

O efeito de menor consumo de combustível está associado também à quantidade de ar nas fases de expansão e compressão nos cilindros do motor em que pode melhorar o desempenho do motor. Quando o motor fornece a melhor potência no seu eixo com diminuição do combustível, teríamos a melhor relação ar e combustível.

A relação de ar e combustível (AC) acolhida pelo motor segue uma proporção de massas. A equação 2.5 representa essa relação.

$$AC = \frac{\text{massa de ar } (m_{ar})}{\text{massa de combustível } (m_c)} \quad 2.5$$

O resultado da fração da equação 2.5 pode ser convencionado de acordo com a tabela 2.10.

Essa máquina tem uma vasta utilização e tecnologia bastante difundida, classificada pelo tipo de combustível utilizado: motor de ciclo *Otto* e motor de ciclo *Diesel*. A figura 2.11 compara os dois ciclos mencionados, considerando as mesmas condições de entrada e as mesmas taxas de compressão.

Os motores de ciclo *Otto* são acionados pelo processo de ignição a centelha e os de ciclo *Diesel* pelo processo de ignição à compressão. Ambos são motores de quatro tempos necessitando de quatro estágios para produzir um ciclo de potência. Os pontos PMS e PMI se referem à posição do pistão quando apresenta menor e maior volume no

cilindro, respectivamente. O traçado do gráfico 6 – 1(5) corresponde ao processo de admissão e o retorno (5)1 – 6 ao de descarga.

Tabela 2.10 Resultados da fração de massa ar / combustível

AC	Tipo de mistura
< 1	Rica
= 1	Estequiométrica
>1	Pobre

Melhorias nas tecnologias da ignição por centelha e as reduções das emissões poluentes fazem o motor de combustão interna apresentar tecnologia dominante até 2030. Os gases naturais e os combustíveis alternativos são combustíveis realísticos a curto e médio prazo em substituição aos combustíveis fósseis convencionais (SALES, 2012).

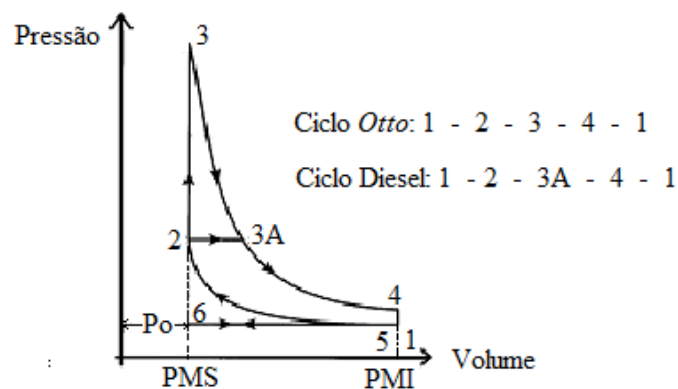


Figura 2.11 Comparação entre os dois ciclos teóricos: Otto e Diesel (Pulkrabek, 2004)

Esses motores a gás natural são aplicados em dois setores da economia, derivativos automotivos e industrial, substituídos pelos de ciclo *Otto* a gasolina. Nos motores projetados para a indústria, o tempo é superior aos automotivos com velocidade de rotação de 1800 RPM e tempo de manutenção relevantes superiores a 20000h de operação (MELLO JR., 2006).

2.5.2 Gerador Síncrono

As máquinas elétricas são dispositivos que usam o princípio da conservação da energia, mudando apenas de forma, transformando energia mecânica em elétrica ou vice versa. Pelo princípio da primeira lei da termodinâmica, através do sistema considerado isolado e com seus limites definidos, pode-se acompanhar a conversão dessa energia.

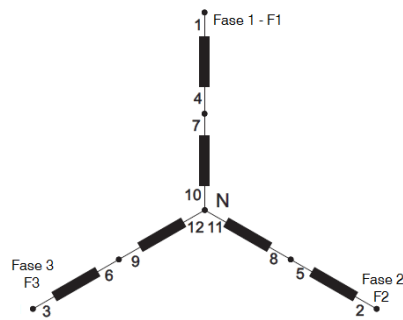
O fluxo de energia que entra no sistema a partir dos limites definidos é igual à soma das taxas de energia armazenada no sistema. No caso das máquinas elétricas, o sistema de armazenamento dessa energia é o campo magnético. A equação 2.6 mostra o equacionamento da transferência de energia (Filtzgerald, Kingsley Jr. e Umans, 2006):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entrada de} \\ \text{energia a partir} \\ \text{de fontes elétricas} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Saída de} \\ \text{energia} \\ \text{mecânica} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Aumento da energia} \\ \text{armazenada no campo} \\ \text{magnético} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{convertida} \\ \text{em calor} \end{array} \right) \quad (2.6)$$

Como essa equação é destinada a ação geradora, os termos de energia elétrica e magnética apresentam valores negativos. A energia convertida em calor decorre do efeito *joule* nos aquecimentos ôhmicos (fluxo de corrente nos enrolamentos dos terminais elétricos) e atritos mecânicos decorrentes do movimento dos componentes de sistemas que formam os terminais mecânicos.

A segunda coluna da tabela 2.9 apresenta alguns parâmetros elétricos do alternador. Entre esses parâmetros, a potência nominal aparente de geração e o fator de potência de 0,8. Portanto, a potência útil fornecida às cargas é de 80 KW.

A estrutura do gerador aloja uma caixa onde estão localizados os terminais da bobina do estator com o terminal neutro. Dessa caixa, os cabos de potência são ligados ao quadro de comando do GMG. As interligações das bobinas do gerador compostas de três pares de bobinas interligadas no modelo estrela e com o neutro ligado no “centro estrela” produzem energia elétrica no nível de tensão trifásica de 380V, e frequência de 60Hz. A figura 2.12 mostra o esquema de ligação e a vista axial do rotor.



(a) Os terminais 1-4; 2-5; 3-6; 7-10; 8-11 e 9-12 representam as bobinas de fornecimento de energia elétrica da fabricante HEIMER

Figura 2.12 Conexão das bobinas do estator em ligação “estrela”; (b) Gerador elétrico.

Os geradores elétricos podem ser acionados por diferentes máquinas primárias. No entanto, a máquina primária determina um projeto específico para o gerador. As máquinas mais usuais são: turbina hidráulica; turbina a vapor e motor de combustão interna.

Os geradores acionados por motores são máquinas com a finalidade de geração de energia ativa. Os níveis de potência estimados são inferiores a 25 MW, operando com velocidade superior a 1500 RPM (MAMEDE, 2013).

O tempo de operação desses geradores pode ser classificado de três tipos:

- Potência *Prime*: potência contínua por tempo limitada recomendada a 1000h de operação por ano com os tipos de cargas variáveis com limitação de 10% de sobrecarga num período de 1h (intervalo de 12h de operação);
- Potência *Standby*: potência de emergência que atende a cargas variáveis, não permitindo sobrecarga com o limite de operação de 300h;
- Potência Contínua: conhecida como *continuous power*, gera em regime permanente, sem interrupção e atende a cargas constantes (não é permitida sobrecargas) com um tempo recomendado de 8400 h de operação no ano.

Outro fator importante na consideração dos geradores é o aterramento do ponto neutro das bobinas do estator. Esse ponto neutro é solidamente aterrado, visando reduzir o valor da corrente de defeito a terra.

2.5.3 Sistema de Refrigeração

A utilização da refrigeração e do condicionamento de ar representou um grande avanço na humanidade moderna. Controlar temperatura em ambientes fechados, conservar alimentos a temperaturas apropriadas são exemplos de conforto na vida das pessoas.

A descoberta dos fluórcarbonos (FCs) foi obtida pelo engenheiro químico e mecânico americano Thomas Midgely (1889 - 1944) em 1928, que tinha como objetivo alavancar o crescimento da indústria de refrigeração. O refrigerante diclorodifluormetano (CFC-12) descoberto resultou num “não inflamável” e com baixa toxicidade. A obtenção do CFC propiciou a melhoria dos refrigerantes tornando-os mais eficientes e seguros.

O impacto ambiental na camada de ozônio por efeito dos CFCs foi descoberto em 1947, propiciando novas pesquisas no intuito de conseguir produtos que ocasionassem menor impacto ambiental. Em 1970, as pesquisas demonstraram que compostos como Halon, Clorofluorcabono (CFC), Hidroclorofluorcabono (HCFC) e outros contribuíam para a degradação da camada de ozônio (GARRIDO, 2013).

O protocolo de Montreal foi instituído em 1987, com o objetivo de eliminar substâncias que degradavam a camada de ozônio, entrando em vigor em janeiro de 1989, com adesão de 197 países.

O Brasil aderiu ao protocolo e possui um cronograma de redução de HCFCs que até o ano de 2012, a legislação previa que a importação desses refrigerantes ocorresse com base no potencial de destruição da camada de ozônio. Em 2013, houve alteração na norma para que fosse o produto, o fator determinante. No ano de 2015, a redução será progressiva da quantidade de HCFCs importada e até o ano de 2040, 100% desses produtos serão eliminados (GARRIDO, 2013).

Devido o crescimento econômico brasileiro ser real, mesmo em percentuais pequenos, a procura no setor de refrigeração tende a se elevar cada vez mais, impactando a disponibilidade dos HCFCs e propiciando soluções alternativas de fluidos refrigerantes considerados ambientalmente aceitáveis para o mercado. Entre esses tipos de refrigerante, o de ciclo de absorção não representa impacto ambiental.

A principal diferença entre o ciclo de absorção e o de compressão de vapor é o processo pelo qual o refrigerante de baixa pressão é transformado em vapor de alta

pressão. No ciclo de compressão, o vapor de baixa pressão é comprimido mecanicamente por um compressor. No ciclo de absorção, o vapor de baixa pressão é absorvido numa solução e bombeado para elevar, e, em seguida, aquecido para produzir o vapor de alta pressão. As temperaturas de condensação e evaporação são similares para os dois processos (DORGAN, DORGAN e LEIGHT, 1995).

As máquinas de refrigeração por absorção são utilizadas para condicionamento de ar e tem que dispor de um ponto de fluido quente na entrada (água quente, gases de escape, por exemplo), obtendo a água gelada na saída da máquina a partir da combinação com um absorvente. O absorvente combinado com a água deve ser mutuamente solúvel nas condições de funcionamento. A figura 2.13 mostra a entrada do fluido quente aquecido a partir do recuperador de calor pelos gases de escape do motor de combustão interna do sistema de cogeração.

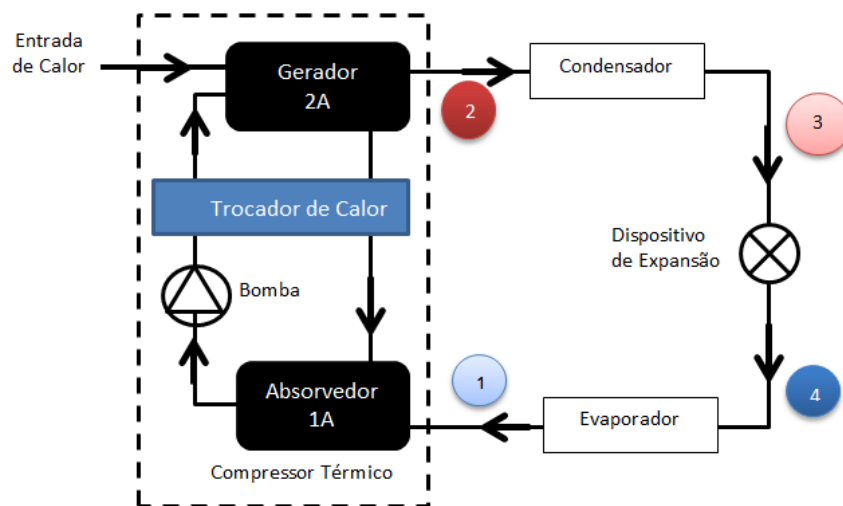


Figura 2.13 O ciclo de refrigeração por absorção, adaptado (DORGAN, DORGAN e LEIGHT, 1995).

Há duas combinações de sistema de absorção mais usuais: Amônia (NH_3) e Brometo de lítio (LiBr). O primeiro absorvente é um dos mais usuais e o segundo, o mais recente (DOSSAT, 1995). Ambos os absorventes são combinados com o refrigerante (água) formando o sistema de refrigeração por absorção.

Em regime de funcionamento, os gases de escape que são oriundos do motor de combustão interna do sistema de cogeração em estudo, são acoplados na tubulação que direciona para o recuperador de calor, permutando calor por convecção e condução,

ocasionando elevação da temperatura do fluido do sistema de refrigeração Amônia – Água, como também acoplado diretamente no gerador do sistema de refrigeração.

Os gases de escape oriundos do motor de combustão interna podem chegar a uma potência debitada do motor de 30%. As perdas existentes por convecção e radiação, a temperaturas médias de 600°C na parte inicial do tubo, podem chegar a uma razão de 5:1 (Martins, 2006).

2.5.4 Planta de Cogeração

A planta de cogeração é projetada com o objetivo de retirar os melhores benefícios técnico-econômicos do sistema. Há vários tipos de benefícios a serem aproveitados nas plantas, um deles é a aproximação de todos os sistemas que integram a planta de cogeração, diminuindo perdas de energia elétrica e caloríficas. Um fator importante a ser considerado é o indicador ecológico e ambiental para uma planta. Um exemplo é o uso da exergia, que poderia ser considerada desprezada e não útil, pelos gases de escapamento em motor de combustão interna, bem como a análise exergoambiental.

O consumo simultâneo das energias térmica e eletromecânica, chamado também de plantas de potência (CESPEDES, 1998), pode ser encontrado nos segmentos: residencial, comercial, agrícola e industrial. Essas plantas de potência são definidas a partir dos conceitos termodinâmicos de Rankine (turbina a vapor), Brayton (turbina a gás), Diesel (MCI) e *Otto* (MCI).

O consumo térmico na cogeração emprega fluxo em processamentos de aquecimento e/ou de refrigeração. Para geração de frio, o processo utilizado pode ser mediante ciclos de absorção. Os componentes estruturais na planta de cogeração devem estar próximos às fontes térmicas, o que limita aplicações específicas por não poder levar calor a longas distâncias. As temperaturas geradas devem ser usadas localmente e o gerador elétrico apresenta importância maior em relação ao calor, o que tem que ser levado em consideração a avaliação econômica da planta (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Na implantação da planta de cogeração que empregam MCI, turbina a gás e turbina a vapor, a rejeição de calor não convertido em potência de eixo existe em todas elas. Portanto, o arranjo da geração de calor com a da eletricidade é apresentada de duas

formas: geração de energia elétrica antecede a geração térmica (*topping*) e geração de eletricidade situada após a geração térmica (*bottoming*). A tabela 2.11 e a figura 2.14 mostram características dessas tecnologias.

Tabela 2.11 Estrutura dos Sistemas de Cogeração

Tipos de Sistemas	Fluxo de Energia
<i>Topping</i>	Da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento se dá para a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), e em seguida para o aproveitamento de calor útil.
<i>Bottoming</i>	Quando, da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento se dá para o aproveitamento de calor útil a elevadas temperaturas, e em seguida para a geração de energia eletromecânica.

O tipo de planta trabalhado é o modelo *topping* em que a máquina primária alimentada por gás natural acoplada a um gerador é acionada, gerando eletricidade e, simultaneamente os gases de escape produzidos pela máquina primária, produção de calor.

Sabendo que a temperatura de rejeição da geração termelétrica encontra-se mais elevada que a temperatura encontrada nos processos industriais, é racional que se pense num sistema de cogeração do tipo *topping*, onde o calor utilizado pelo processo industrial é aproveitado do rejeito da geração elétrica.

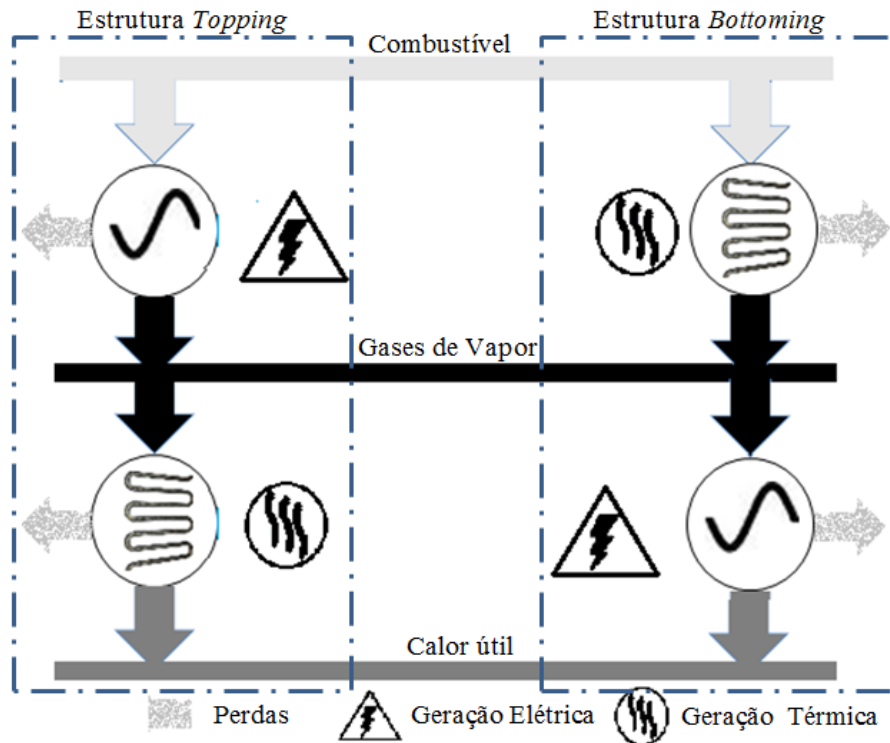


Figura 2.14 Esquema ilustrado do sistema de cogeração do ciclo topping e bottoming

A planta de alto desempenho é dividida em dois sistemas de operação: o primeiro representa a parte do sistema elétrico que compõe o processo automatizado com o gerador elétrico e a rede convencional, e o segundo com três tipologias a serem realizadas de acordo com o ensaio desejado. O sistema do recuperador de calor que constitui uma das tipologias, troca calor com o sistema de refrigeração e reaproveita os vapores de processo oriundos da máquina de refrigeração para a usina. A figura 2.15 mostra o protótipo desenvolvido no modelo *topping* em que se vê o reaproveitamento dos gases de escape para o recuperador de calor. A geração de eletricidade é fornecida pelo gerador (corpo verde) e alimenta o Quadro Geral de Força (QGF).

A seta na vertical faz referência ao sentido do fluxo do óleo a ser aquecido pelo recuperador de calor. Os gases oriundos do escape (seta na horizontal) são usados como combustível para o recuperador de calor que aquecerá o produto (óleo) para a usina.

Foi projetada uma válvula de “alívio” no atenuador de ruído para liberar gases do escapamento com o objetivo de redução da temperatura.

O sistema de cogeração pode ser a fonte primária de fornecimento de energia elétrica pelo alternador síncrono do grupo motor gerador ou a distribuição

convencional de energia elétrica da concessionária local. Portanto, há a necessidade de dispositivo de comutação dessas fontes de alimentação aos consumidores (prédio da RECOGÁS), separando-os sem que haja a possibilidade de ligação simultânea (modo seguro).



Figura 2.15 Vista panorâmica do SAD

Há um quadro de comando para supervisionar o grupo motor gerador. Essa unidade de supervisão faz o controle de partida e parada do MCI como também a proteção do motor e do alternador. Os quadros são certificados pela ISO 9001, bem como homologados pela Anatel e tem controle por identificação de códigos de barra (HEIMER, 2010).

CAPITULO III

O Sistema de Alto Desempenho (SAD) foi dividido em subsistemas que são: trocador de calor, alternador síncrono, motor de combustão interna, máquina de refrigeração por absorção e resistência térmica (usina de biodiesel). Cada subsistema apresenta características próprias e são observadas de modo separado. No entanto, dependendo do arranjo, um subsistema pode ser excluído do SAD.

Foram desenvolvidos três arranjos classificados como Arranjo 1, Arranjo 2 e Arranjo 3. As três figuras a seguir mostram as plantas baixas desses arranjos.

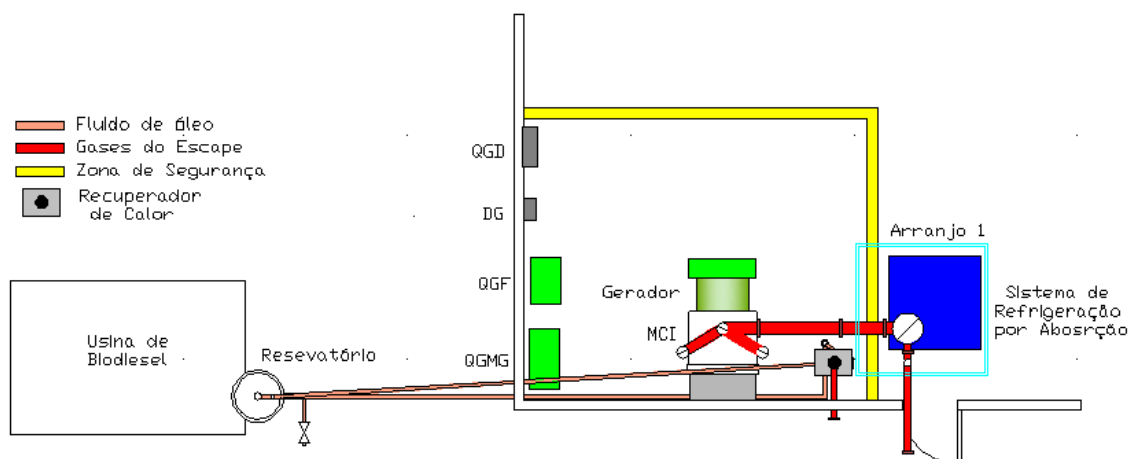


Figura 3.1 Planta baixa para o Arranjo 1

Na figura 3.1 que mostra a planta baixa do arranjo 1, o SAD constitui os subsistemas Grupo Motor Gerador (GMG) e refrigeração. A usina de biodiesel não participa desse sistema devido a não utilização do recuperador de calor.

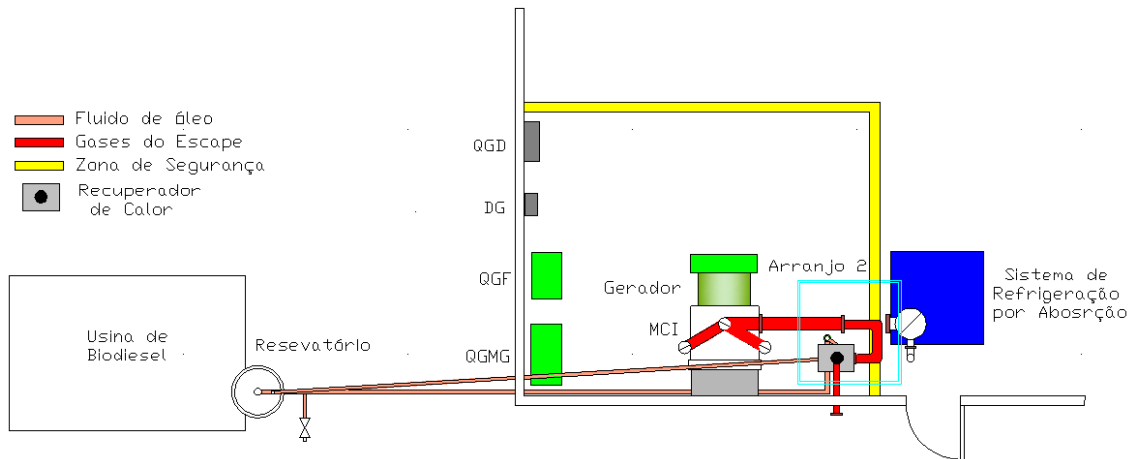


Figura 3.2 Planta baixa do Arranjo 2

No Arranjo 2, apresentado na figura 3.2, também há uma estrutura de cogeração envolvendo os subsistemas GMG, recuperador de calor e a usina de biodiesel. O óleo aquecido pelo recuperador de calor é utilizado na usina para o aquecimento no processo das reações de produção do biodiesel.

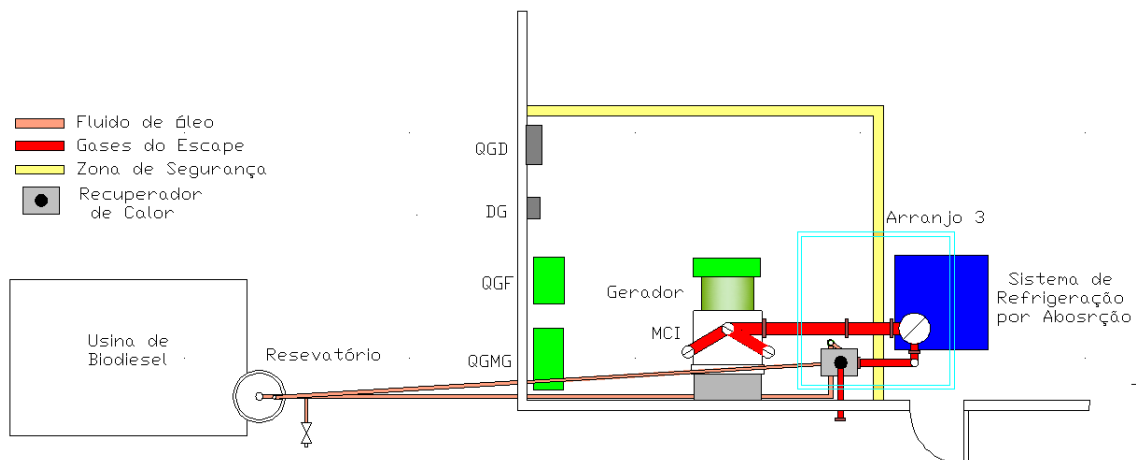


Figura 3.3 Planta baixa do Arranjo 3

No último arranjo, como mostrado na figura 3.3, a estrutura de trieração é apresentada e engloba todos os subsistemas dos arranjos representados nas figuras anteriores. Os gases que seriam jogados no ambiente pelo subsistema de refrigeração, serão reaproveitados para fornecer combustível ao recuperador. O óleo será aquecido e será aproveitado na usina de biodiesel.

O estudo do sistema térmico na literatura atual abrange amplas aplicações com diferentes objetivos, restrições e pré-requisitos. Portanto, o projeto se depara com essas restrições e objetivos.

A transferência de calor e vazões dos fluidos dos fluxos nos equipamentos do SAD são considerações importantes estudadas. Temperatura resultante, fluido aquecido e arrefecido, perdas energéticas e principalmente a eficiência dos equipamentos são as principais objetivos no projeto.

3.1 ANÁLISES ENERGÉTICAS E EXERGÉTICO

Os estudos da termodinâmica permitem relacionar os projetos de energia, principalmente o uso de sistemas térmicos no reaproveitamento de recursos não renováveis, como por exemplo, combustíveis fósseis e de importância para esse trabalho, o gás natural. O mapeamento dos fluxos energéticos a partir de uma matriz geradora, propicia identificar dispositivos importantes e melhorar a eficiência por torna mais susceptível as informações. Os projetos desenvolvidos devem ser estruturados para que forneçam a melhor eficiência, agregando o reaproveitamento de insumos e fatores eco ambientais.

Essa energia, contrariando o conceito da conservação de energia, torna-se inviável na mensuração desses valores quando associado o sistema e o ambiente. As interações entre sistema e ambiente podem propiciar um trabalho máximo possível a partir de dispositivos auxiliares.

3.1.1 Eficiência Energética e Exergética

O cálculo para obter a eficiência energética de acordo com o uso da primeira lei da termodinâmica diferencia do cálculo da eficiência exergética que usa os conceitos da segunda lei.

Torchio (2013) em seu trabalho investiga e compara critérios comuns num sistema Combinado Calor e Eletricidade (CCE) que são energia, exergia, ambiente e aspectos econômicos. As principais quantidades referidas são apresentadas na figura 3.4. Após a análise dos quatro critérios fundamentais na estrutura de um sistema combinado calor e eletricidade, o autor faz o mesmo estudo, considerando os sistemas

de calor e eletricidade individuais, o que possibilita realizar comparações da eficiência nos sistemas propostos.

Dincer (2015) em seu estudo: *Exergy Analysis for Sustainable Building*, mostra o comportamento da sustentabilidade e os impactos ambientais em relação à eficiência exergética. Deve-se destacar, conforme figura 3.5, a eficiência exergética à medida que cresce, aumenta a sustentabilidade e diminui os impactos ambientais.

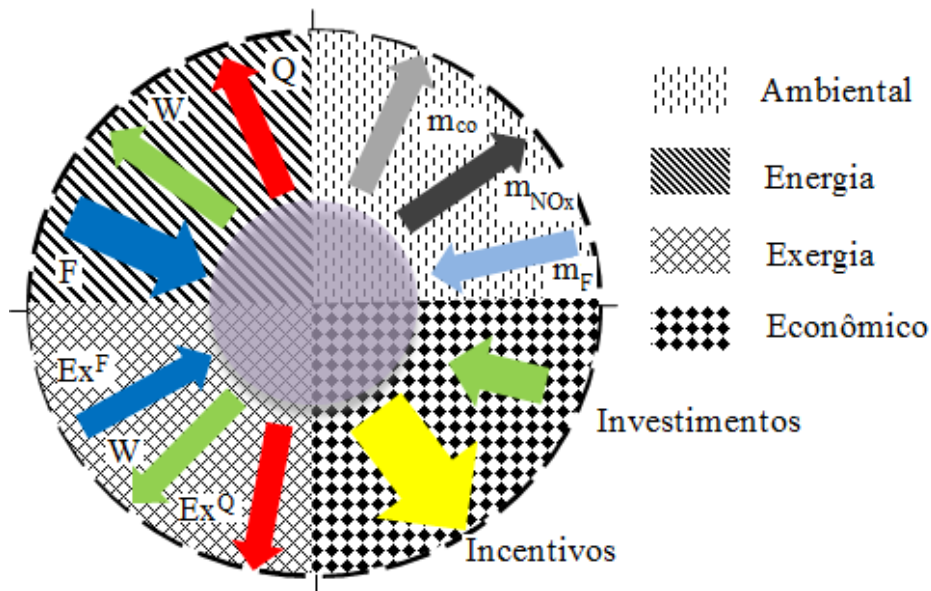


Figura 3.4 Balanço de um sistema combinado térmico e elétrico

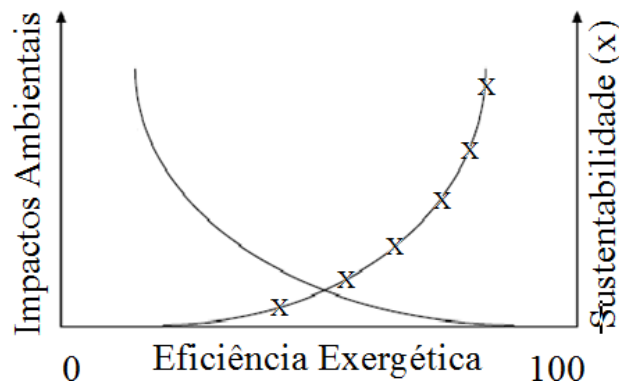


Figura 3.5 Comportamento gráfico dos impactos ambientais e a sustentabilidade com relação a eficiência exergética.

A eficiência total para a 1ª lei da termodinâmica na unidade SAD é dado por:

$$\eta_{SAD} = \frac{\dot{W} + \dot{Q}}{\dot{F}} \quad (3.1)$$

onde $\dot{W}$ é a potência elétrica; $\dot{Q}$ a taxa de calor transferida e $\dot{F}$ a taxa de fornecimento da energia do combustível.

A eficiência total é obtida pela soma das eficiências independentes para térmica $\eta_{SAD,tér}$ e elétrica $\eta_{SAD,ele}$.

$$\eta_{SAD} = \eta_{SAD,ele} + \eta_{SAD,tér} \quad (3.2)$$

Essas eficiências individuais são obtidas pelo quociente da grandeza a que se pretende obter pelo combustível fornecido ao SAD. A equação para essas eficiências é:

$$\eta_{SAD} = \frac{\dot{W}}{\dot{F}} + \frac{\dot{Q}}{\dot{F}} \quad (3.3)$$

A análise exergética, diferente do sistema fechado para a unidade SAD na análise da eficiência energética, é obtida fazendo algumas restrições para sua formulação. A análise da exergia para a transferência de calor no SAD relaciona as energias termomecânica e química. A energia termomecânica constitui as energias: cinética, potencial e física, e que serão desprezadas.

A eficiência exergética é dada pela equação (TORCHIO, 2013):

$$\dot{\epsilon}_{SAD} = \frac{\dot{W} + \dot{Ex}^Q}{\dot{Ex}_{SAD}^F} \quad (3.4)$$

O termo $\dot{Ex}^Q$ pode ser obtido por:

$$\dot{Ex}^Q = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_{env}}{T} \right) \quad (3.5)$$

A eficiência exergética é influenciada pela temperatura de uso (T_u), pois a exergia melhora à medida que se aproxima da temperatura da fonte (T_f). Moran *et al* (2014) representa um gráfico que relaciona a temperatura de uso com o valor percentual exergético.

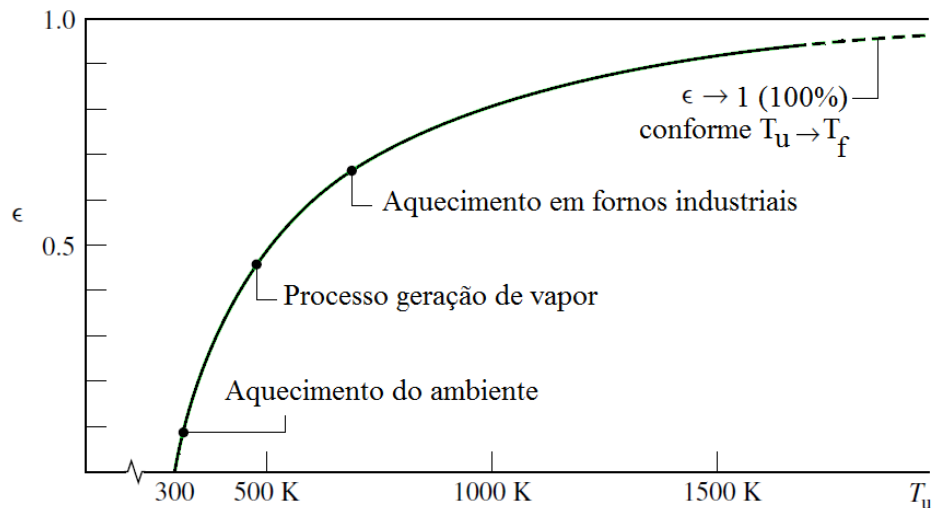


Figura 3.6 Temperaturas estabelecidas de uso e sua eficiência exergética

No projeto desenvolvido há escalas de temperatura para aquecimento na ordem de 90 °C e uso de geração de vapor na ordem de 400 °C.

3.1.2 Primeira e Segunda Lei

A primeira lei da termodinâmica é o princípio da conservação de energia, que expressa a mudança de uma forma de energia para outra, permanecendo conservada toda a energia. Considere o sistema fechado com uma entrada e uma saída, conforme a figura 3.7 (BEJAN, 1988).

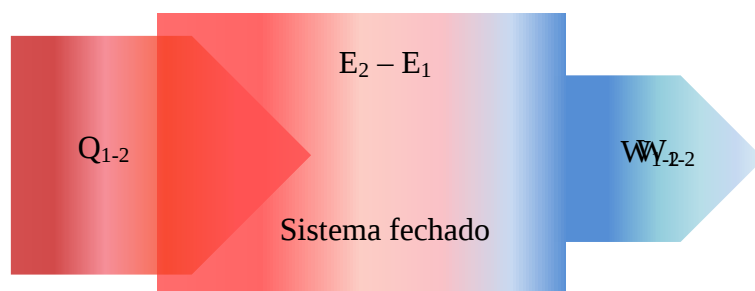


Figura 3.7 Esquema de transferência de calor para trabalho em dois estados

A relação das energias envolvidas no processo da figura 3.7, onde a variação da energia interna $E_2 - E_1$ no sistema fechado é dado pela equação:

$$\begin{array}{rcl}
(Q_{1-2}) & - & (W_{1-2}) = (E_2 - E_1) \\
\text{Calor adicionado no} & \text{Trabalho realizado} & \text{Variação da energia do} \\
\text{sistema durante o} & \text{durante o processo} & \text{sistema durante o processo} \\
\text{processo de estado} & &
\end{array} \quad (3.6)$$

A interação das energias entre a transferência líquida de calor do estado 1 ao estado 2 (Q_{1-2}) e trabalho transferido do estado 1 ao estado 2 (W_{1-2}) num sistema fechado, independente do caminho seguido se conserva. Portanto, o processo executado no sistema fechado num determinado tempo é determinado por:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (3.7)$$

A definição que apresenta várias entradas e saídas num volume de controle correspondente ao somatório dos termos associados a esses escoamentos, tendo uma forma final da primeira lei da termodinâmica definida como:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (3.8)$$

É de grande interesse prático saber que o termo do lado esquerdo da Eq. (3.8) anula-se quando passa a considerar o processo em regime permanente, fazendo com que os fluxos na entrada e na saída sejam iguais e não haja estoque de energia. A conservação de energia está implícita no enunciado da primeira lei da termodinâmica. Essa lei se baseia nos grandes experimentos de Joule na primeira metade do século XIX, não podendo ser obtida por nenhum outro princípio físico conhecido (ÇENGEL, 2006).

A segunda lei da termodinâmica complementa os conceitos da primeira lei e acrescenta novas expressões, procurando maximizar o uso mais eficiente da energia. Em Moran *et al* (2014) são apresentados três enunciados para a segunda lei. O primeiro é o enunciado de Clausius que está relacionado a refrigeradores e bombas de calor, o segundo enunciado é o de Kelvin-Planck que está relacionado a máquinas térmicas e o terceiro é da entropia que apresenta uma gama de aplicações como volume de controle e sistemas fechados.

A equação 3.9 representa o balanço da taxa de variação de uma entropia:

$$\begin{array}{ccccc}
 (S_2 - S_1) & - & \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right) & = & (S_{ger}) \\
 \text{Variação da entropia} & & \text{Transferência de} & & \text{Geração da entropia por} \\
 & & \text{entropia com o calor} & & \text{um processo}
 \end{array} \quad (3.9)$$

A geração de entropia (S_{ger}) surge a partir de efeitos que ocorrem durante o processo de irreversibilidade, tais como, reações químicas, transferência de calor ou atrito. Caso o processo seja reversível, a geração de entropia torna-se nula e, portanto:

$$\begin{array}{ccc}
 (S_2 - S_1) & = & \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right) \\
 \text{Variação da entropia} & & \text{Transferência de entropia com o calor}
 \end{array} \quad (3.10)$$

No fluxo de massa aberto em regime permanente, a segunda lei da termodinâmica determina que ocorra qualquer processo, se a geração de entropia for igual ou maior que zero.

Considerando o volume de controle em regime permanente, o fluxo de massa é o mesmo na entrada e saída, fazendo com que o balanço final seja:

$$0 = \sum \frac{\dot{Q}}{T} - + \sum \dot{m}_e(s_e) - \sum \dot{m}_s(s_s) + \dot{S}_{ger} \quad (3.11)$$

portanto,

$$0 = \sum \frac{\dot{Q}}{T} - + \dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{S}_{ger} \quad (3.12)$$

3.1.3 Análise Exergética

A apresentação do conceito de exergia, segundo Levenspiel (2011) é apresentado na figura 3.8 por um modelo bem simples adaptado do seu livro.

A exergia de modo geral pode ser conceituada como o cálculo do máximo trabalho que se pode extrair, ou o menor dispêndio necessário para uma dada

transformação que se divide em três quantidades: estado 1 e estado 2 do sistema, mais o estado do ambiente, 0.

Levenspiel (2011) afirma que esse conceito foi mencionado inicialmente por J. C. Maxwell, em seu trabalho: *Theory of Heat* (Longmans Green, Londres, 1871). GALLO (1990) em sua tese cita algumas nomenclaturas adotadas:

- Trabalho disponível;
- Energia disponível;
- Disponibilidade e
- Essergia (energia essencial).

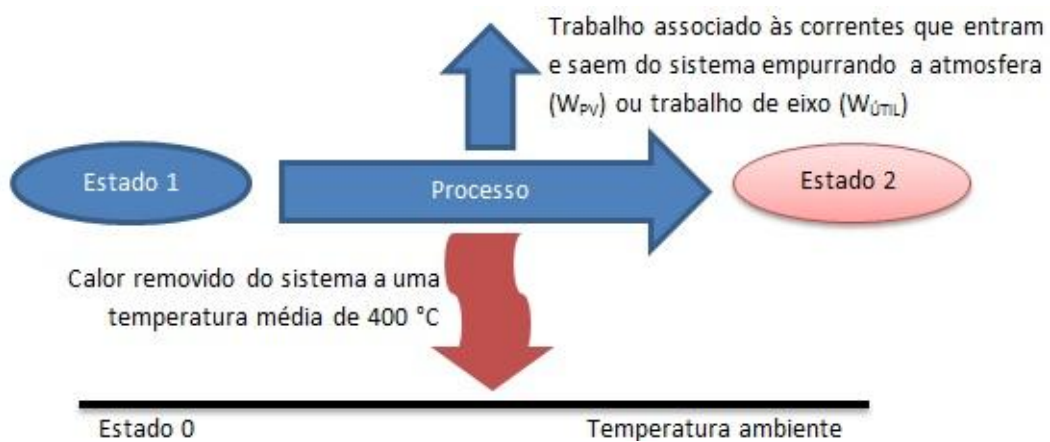


Figura 3.8 Modelo conceitual de exergia

Apenas no *Fourth International Symposium On The Second-Law Analysis Of Thermal Systems*, realizado de 25 a 29 de maio de 1987 na cidade de Roma, a nomenclatura da palavra exergia foi padronizada.

Rant (1956) representou o conceito de exergia como uma parte disponível para produzir trabalho útil para distinguir de todas as outras formas de trabalho. A outra parte é uma quantidade de energia que não está disponível para a realização de trabalho, conhecida como anergia. Portanto esses dois tipos de conceitos constituem a energia.

$$\text{Energia} = \text{Exergia} + \text{Anergia}$$

Gaggioli (1980) ajuda a melhorar a compreensão sobre o conceito dado por Rant em exergia, como sendo uma propriedade que mede a máxima capacidade de causar mudanças num fluxo e/ou substância que não está em equilíbrio estável com o seu

ambiente. Por haver destruição da exergia (ou irreversibilidade), no processo real, a exergia não é atribuída a 1º lei da termodinâmica.

Os resultados da análise da energia constataam índices iguais ao processo de conversão eletromecânica. No entanto, índices de energia interna e calor apresentam imperfeições no processo da conservação de energia e que tornam necessário o cálculo do consumo da energia com outras propriedades que não a energia. A análise exergética propicia a estimativa quantitativa das imperfeições dos processos de conversão de energia (Szargut, 1988).

A energia disponível classificada como exergia no artigo de Ayres, Peio e Mendez (2011) é definida como a quantidade máxima de trabalho que pode ser feito por um subsistema de medida que se aproxima do equilíbrio termodinâmico com o seu ambiente por uma sequência de processos reversíveis.

A definição da exergia seria o limite máximo e mínimo de trabalho útil teórico, podendo ser obtida a partir de um sistema de troca de calor com o ambiente, no intuito de atingir o equilíbrio térmico.

Para Jaluria (2008), exergia é uma medida da disponibilidade de energia térmica a partir de um sistema que geralmente não é conservada e pode ser destruída. A exergia para um ambiente especificado pode ser tratada como uma propriedade extensiva do sistema. Portanto, isto conduz a uma otimização do processo e consequentemente do sistema de melhor custo benefício para uma determinada aplicação. Ainda, segundo o mesmo autor, o objetivo principal da análise exergética é determinar onde e como as perdas ocorrem de modo que a energia a ser aproveitada possa ser utilizada de forma mais eficaz.

O material: *Theory and practices for energy education, traning, regulation and standards* publicado por Szargut (2013) classifica exergia como índice de qualidade de energia. Essa classificação denominada por Z. Rant, expressa a saída de trabalho máxima atingível no ambiente natural ou uma entrada de trabalho mínima necessária para realizar um processo oposto. No mesmo material, cita uma segunda versão proposta por Riekert e que considera muito convincente:

exergia é um eixo de trabalho ou a energia elétrica necessária para produzir um material no seu estado especificado de materiais comuns no ambiente

natural, de uma forma reversível, sendo o calor trocado apenas com o meio ambiente.

Para Szargut (2013), exergia é função do estado da matéria e dos componentes comuns ao ambiente.

Todos os processos reais são irreversíveis. Essa irreversibilidade implica um aumento da soma dos valores de entropia de todos os organismos que participam no processo analisado. A fim de aplicar este princípio, deve ser definido um sistema isolado que compreenda todos os organismos que participam no processo. De acordo com a lei de Gouy-Stodola, o resultado é proporcional à soma das entropias de todos os organismos que participam no processo.

3.1.4 Potência Energética

Os ensaios realizados no sistema de cogeração, além das medições realizadas, propiciaram uma inspeção visual sobre o comportamento funcional do grupo motor gerador, recuperador de calor e sistema de refrigeração, bem como o comportamento das cargas elétricas interconectadas ao gerador, principalmente ao sistema de refrigeração para alimentação das bombas.

Isso possibilitou observar fatores externos durante horários predeterminados como temperatura ambiente e o fluxo de massa de ar em torno do sistema de cogeração. Foram observados fatores construtivos e de montagens, entre eles temos:

- i. Instalação adequada dos quadros de distribuição e carga;
- ii. Operação na tensão e frequência de energia elétrica, tanto do gerador, como da rede convencional;
- iii. Fornecimento do combustível ao MCI, observando principalmente fatores como vazamentos externos na tubulação de alimentação;

Dentre esses ensaios, foram realizadas medições de temperatura em todo o sistema de cogeração, vazão do fluido, pressão, análises de gases e velocidade.

As medidas realizadas dos gases de escape, sistema de arrefecimento, gás natural e óleo vegetal são importantes para os cálculos das quantidades de calor do sistema como o todo.

Com valores de vazão do óleo, sistema de arrefecimento do MCI e medições das temperaturas, as quantidades de calor produzidas no SAD serão calculadas a partir da equação 3.13.

$$\dot{Q}_r = (\dot{q}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.13)$$

A vazão é dada por $\dot{q}$, ρ a massa específica, c_p o calor específico e ΔT a variação de temperatura do fluido em estudo.

Para cada componente a ser analisado por volume de controle, perdas de cargas nas tubulações foram desprezadas e todo o sistema opera no regime permanente. Para as energias cinética, potencial e física, os valores são desprezados.

O volume de controle dos componentes para análise envolve apenas o fluido de trabalho de entrada e saída.

O SAD em estudo apresenta diferenças de temperatura no meio físico em que se encontra. Portanto, os tipos de processos de transferência de calor existentes. A condução, a convecção e a radiação são um desses tipos de processo. No cálculo das perdas, será tratado apenas o processo por radiação, em que ocorre a transferência de calor entre a superfície do GMG e o ambiente.

Os valores calculados de energia são colocados em fluxo de energia. A estrutura do diagrama de *Sankey* faz subdivisões das potências energéticas, existentes em todo o sistema de modo percentual e numérica, que mostram a fiabilidade do sistema com outros estudos da área de cogeração. Já o diagrama de Grassmann é a representação do fluxo de exergia.

Segundo Silva, 2013, não há literatura que explique a origem do diagrama de *Grassmann* e por ser uma aplicação específica do diagrama de *Sankey*, é comum classificar os diagramas de fluxo de exergia como diagrama *Sankey*. A figura 3.9 mostra a estrutura do diagrama.

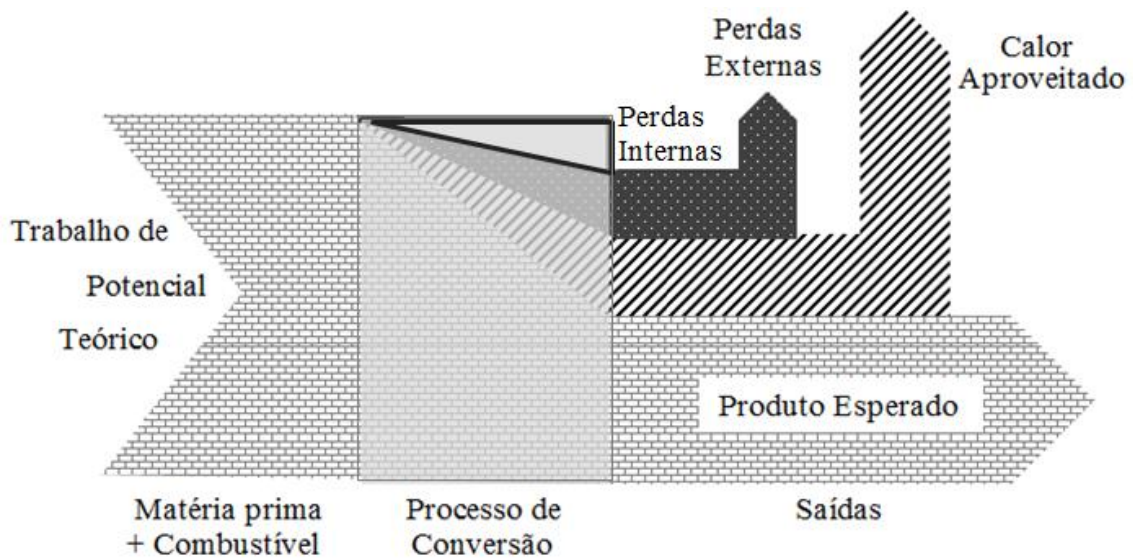


Figura 3.9 Estrutura do Diagrama de Grassuman para uma conversão de processo exergético

O percentual de reaproveitamento da potência de arrefecimento do MCI é considerável comparado aos de eletricidade e perdas e, como as perdas, não está sendo aproveitado.

Os valores para as perdas não calculadas decorrem de valores físicos e químicos que tornam indisponíveis para o IES suas medições. O exemplo dessas perdas é o cálculo do ciclo *Otto* ideal em que o percentual da massa residual existente no cilindro, ser considerado zero. No cálculo, as massas consideradas foram apenas a do combustível e a do ar. Outro fator não considerado nas perdas são os dados fornecidos pelo fabricante. O MCI perde a potência de 1% a cada 5°C para temperaturas acima de 40 °C, ou seja, a potência do combustível garantida é até 40 °C.

3.1.5 Potência Exergética

O cálculo da exergia apresenta fatores que devem ser considerados nos resultados. A região próxima ao processo, o ambiente em torno dessa vizinhança, a transferência para ou desde o sistema nessa fronteira devem ser observados.

A vizinhança em torno do processo é alimentada por um fluxo massico que associa à transferência de calor e trabalho útil na ponta do eixo do MCI. O estado final no fluxo exergético que é representado pelo estado morto tem valor de $T_0 = 298,15 \text{ K}$ e $P_0 = 101,13 \text{ KPa}$.

O equacionamento matemático para a exergia (Ex) pode ser representado pela soma das exergias física (Ex^{fis}), química (Ex^{qui}), cinética (Ex^{cin}) e potencial (Ex^{pot}) como mostra a equação 3.14. Esse sistema interage com o meio ambiente que apresenta os valores padrões para o estado morto mencionado da temperatura e pressão (KOTAS, 1995).

$$Ex = Ex^{fis} + Ex^{qui} + Ex^{cin} + Ex^{pot} \quad (3.14)$$

O fluxo de massa é associado por combustível hidrocarboneto e uma corrente de ar como reagentes. A exergia resultante na entrada é apenas a do combustível, já que o ar de combustão encontra-se na condição ambiente. Portanto, a exergia de saída do motor em regime permanente, acompanha parte fracionada de trabalho, calor, produto da combustão e taxa de irreversibilidade. Essa taxa de irreversibilidade justifica a exergia para o volume de controle no MCI ser maior do que a exergia vinda do volume de controle.

Os valores para exergia cinética e potencial são considerados nulos, ou seja, $Ex^{cin} = Ex^{pot} = 0$, o que acarreta apenas as exergias física e química do processo. Quando a exergia física do sistema encontra-se em equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente, seu valor se anula (Moran *et al*, 2002). Portanto, o valor da exergia será dado somente pela exergia química.

O cálculo para a obtenção dos gases (produto da reação química da combustão do gás natural) de exaustão é dado pela soma das potências do sistema de refrigeração e dos vapores de processo.

Além do cálculo da exergia fornecido pelos gases de escape, as exergias para os demais subsistemas também serão obtidos. Por exemplo, o que possibilitará a mensurar a medição de potência a ser usada na usina de biodiesel.

Os valores específicos da exergia química do combustível (ex_{comb}^{qui}) e da combustão (ex_{gas}^{qui}) podem ser obtidos pelas Eqs. 3.15 e 3.16 (Kotas, 1985).

$$ex_{comb}^{qui} = \phi \times Q_{GN} \quad (3.15)$$

$$ex_{gas}^{qui} = \left(R \cdot T_0 \sum x_i \cdot \ln x_i \right) \quad (3.16)$$

O termo do lado direito da equação 3.16 calcula a soma das parcelas da exergia química da fração molar da mistura (x_i) multiplicado pela constante universal dos gases R e a temperatura padrão já mencionada.

Nos processos industriais utilizam-se diferentes substâncias (valores de exergia) que são apresentadas em tabelas (KOTAS 1985, SZARGUT 1988).

A determinação do fator ϕ segue a metodologia que fora proposta por Szargut *et al.*(1988) onde as variáveis H e C representam o percentual massico dos elementos químicos no combustível e N_c o número de moléculas de carbono

$$\phi = 1,0334 + 0,0183 \cdot \frac{H}{C} + 0,0694 \cdot \frac{1}{N_c} \quad (3.17)$$

A representação do balanço exergético na análise pode ser mostrado pelo diagrama de Grassmann. Esse diagrama é uma adaptação do diagrama de Sankey apresentado nesse trabalho. O diagrama apresenta os fluxos exergéticos, as irreversibilidades e os resíduos de cada subsistema do sistema, apresentando as divisões do fluxo exergético.

Os valores para a exergia do combustível e da exergia dos gases são apresentados no diagrama de Grassman mostrado na Figura 3.10.

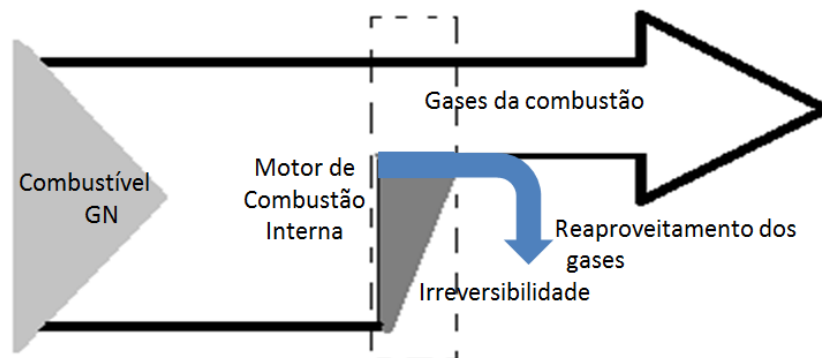


Figura 3.10 Fluxo de exergia no sistema de cogeração usando Diagrama de Grassmann

A exergia na eletricidade é praticamente exergia pura, pois ela pode ser totalmente convertida em calor elevado a temperatura em um forno elétrico ou produzir trabalho mecânico por um motor elétrico. Portanto, AYRES, PEIRÓ e MENDEZ (2011) a partir dessa perspectiva, afirmam que todos os materiais naturais e industriais

podem ser caracterizados em termos de conteúdo de exergia. Os autores classificam em baixo teor exergético os materiais quimicamente inertes, como a água, dióxido de carbono, óxido de ferro e alto teor combustível e biomassa.

3.2 QUALIDADE DE ENERGIA

O sistema de alto desempenho, especificamente o que se trata da geração de energia elétrica pelo alternador será distribuído nos blocos já citados. A energia a serem fornecidas as cargas será monitorada, no qual analisará os possíveis problemas associados ao que se refere a qualidade de energia. Os dados coletados possibilitará a análise do impacto dos distúrbios elétricos fornecidos pelo gerador, bem como o comportamento do mesmo (gerador) seguindo a norma IEEE- 1159.

As normativas IEEE-1159 de 2001 é muito utilizada para o monitoramento dos instrumentos para avaliar a qualidade em um determinado circuito, auxiliando na definição de parâmetros da qualidade da energia e permitindo interpretações dos resultados monitorados.

Segundo Dugan *at al* (2004), a definição mais apropriada para qualidade de energia é qualquer problema de energia manifestado nas grandezas de tensão, corrente e frequência, resultando em falha de operação de fornecimento de energia no equipamento. Portanto, a análise da qualidade de energia é uma preocupação do consumidor final da energia e não um fator estatístico de confiabilidade em que as operadoras de energia fornecem. A ANEEL fiscaliza os parâmetros nas concessionárias de energia elétrica que permite aos fabricantes produzirem seus produtos dentro de um limite aceitável, caracterizando uma qualidade aceitável de energia.

O fluxo de energia gerado controla um limite no nível de tensão, isso porque não tem o controle sobre as correntes que algumas cargas podem gerar. As correntes alternadas operam na frequência de 60 Hz e com certa magnitude. Caso haja desvio significativo na onda de magnitude, frequência ou perturbação no sinal sinaliza um potencial problema de qualidade de energia.

Na figura 3.11 é possível analisar o efeito da tensão sobre a elevação da corrente. À medida que a corrente se eleva no motor de 5 CV, o sinal de tensão sofre uma queda percentual (MARTINHO, 2011). A queda de tensão de 15% chega a elevar a corrente em valores próximos de 14% do seu valor nominal. Dentre os efeitos que

podem ocasionar no sistema podemos citar dois: parada de funcionamento de equipamentos eletrônicos por falta de tensão suficiente e sobre aquecimento nas cargas.

Esse fenômeno de redução da tensão, podendo ser chamado de afundamento de tensão ou *SAG* é uma variação que reduz a tensão de pico de fornecimento. O efeito contrário, ou seja, a elevação de tensão, também conhecida como *SWELL* é caracterizado pela elevação do valor de pico de tensão. O efeito *SWELL* compromete principalmente equipamentos sensíveis aos níveis de tensão, como por exemplo, os componentes eletrônicos. Para ambos os efeitos *SAG* ou *SWELL*, um novo parâmetro deve ser agregado a essa perturbação de tensão que é o tempo de variação do efeito.

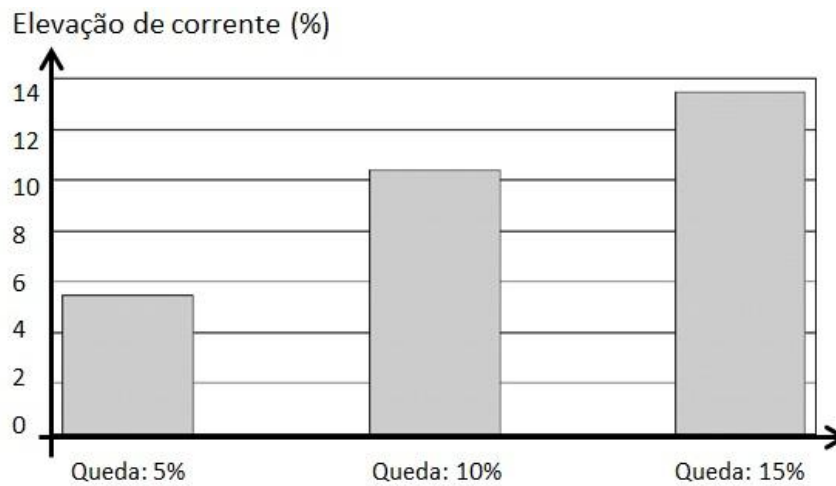


Figura 3.11 Percentual da queda de tensão em função do percentual de elevação de corrente numa carga de 5 CV

A engenharia dividiu a variação de tensão em duas categorias de variação de tensão que pode ser classificada de curta e longa duração segundo MARTINHO (2011), com seus respectivos níveis de tensão que estão apresentados na tabela 3.1.

Distúrbios no sistema elétrico são possíveis causadores de desperdício de energia, no qual não sendo averiguados e corrigidos poderão comprometer a eficiência da energia gerada. Entre alguns fatores dessa perda de qualidade, a redução da vida útil de dispositivos, ineficiência de máquinas e principalmente as perdas elétricas que se agravam com funcionamento de equipamentos que operam fora da normalidade. O gráfico da figura 3.12 mostra as tolerâncias de variação de tensão publicada pelo *Information Technology Industry Council* datado de 2002 e as regiões de operacionalidade ininterrupta.

Tabela 3.1 Intervalo dos parâmetros para SAG e SWELL

Efeito	SAG	SWELL
Parâmetro		
Tensão de Pico	0,1 a 0,9 p.u. ¹	1,1 a 1,8 p.u.
Tempo em ciclos	0,5 a 60	> 60

As três regiões apresentadas no gráfico correspondam aos projetos de equipamentos (região 1), potência de eletrônicos e armazenamento de energia (região 2) e a terceira região corresponde a capacidade de geração, além das citadas na 2 (MARTINHO, 2011).

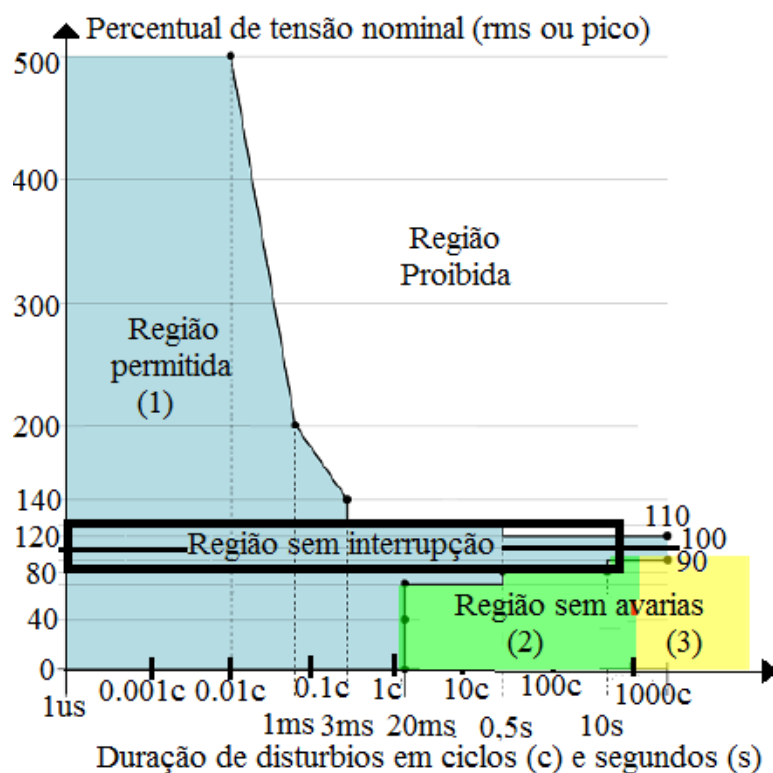


Figura 3.12 Níveis de afundamento de tensão com o ciclo de interrupção

Na disciplina: Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica os professores Decmann e Pomilio (2010) citam passos para diagnosticar problemas relativos à qualidade de energia elétrica. Entre os passos, há dois que são fundamentais para os projetos da natureza desse trabalho. O primeiro é a medição e registro das grandezas (contempla os sintomas do problema) e o segundo é confrontar os dados e resultados

obtidos com estudos ou simulações. Um dos exemplos comuns que deve ser verificado é o afundamento da tensão ocasionado por falha na partida ou falta de fase. Ambos os problemas são solucionados por conta do fluxo energético ser acionado apenas quando o grupo motor gerador entra em regime operacional (se estabiliza), adquirindo a estabilidade de acordo com a quantificação nominal. Outro exemplo comum é o fenômeno térmico que geralmente é lento e que necessita de registradores para períodos maiores de medição.

Os dados a serem averiguados são obtidos por analisador de energia que permitira ver os níveis de tensão atribuídos no fornecimento da energia. Parâmetros como as potências ativa (KW), reativas (KVA_r) e aparentes (KVA) são possíveis de serem observadas. O comportamento das formas de ondas, análise que o analisador de energia faz, também poderá ser analisado por osciloscópio, permitindo visualizar oscilações que venham surgir e que permitem diagnosticar fatores que levaram a esse tipo de problema. O fluxo de energia elétrica do grupo motor gerador com as potências do sistema e o medidor de energia ativa permanente que faz a medição da utilização na alimentação das cargas são visto na figura 3.13.

Nos ensaios, serão realizadas medidas a cada três dias na semana no período de um mês, avaliando os procedimentos de medição pontual e o surgimento de alguns distúrbios diferentes nesse período. Será produzido um relatório nos setores que irão receber o fluxo de energia, visando obter informações sobre possíveis falhas ocorridas durante o período de monitoramento. No apêndice A, encontra-se um modelo de anotações dos circuitos e fases que alimentam a carga.

Para estes ensaios do grupo motor gerador com as cargas elétricas é necessário construir um modelo que contemple a simulação e ajude nas soluções a serem tomadas, apresentando a viabilidade do sistema.

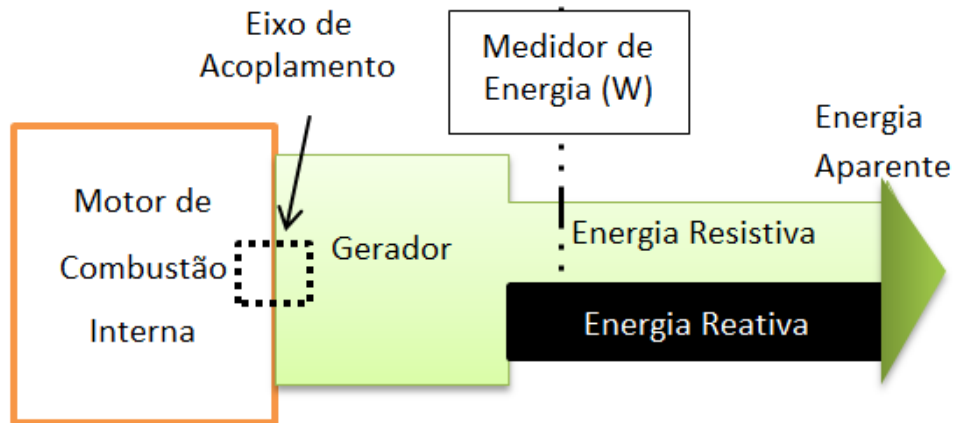
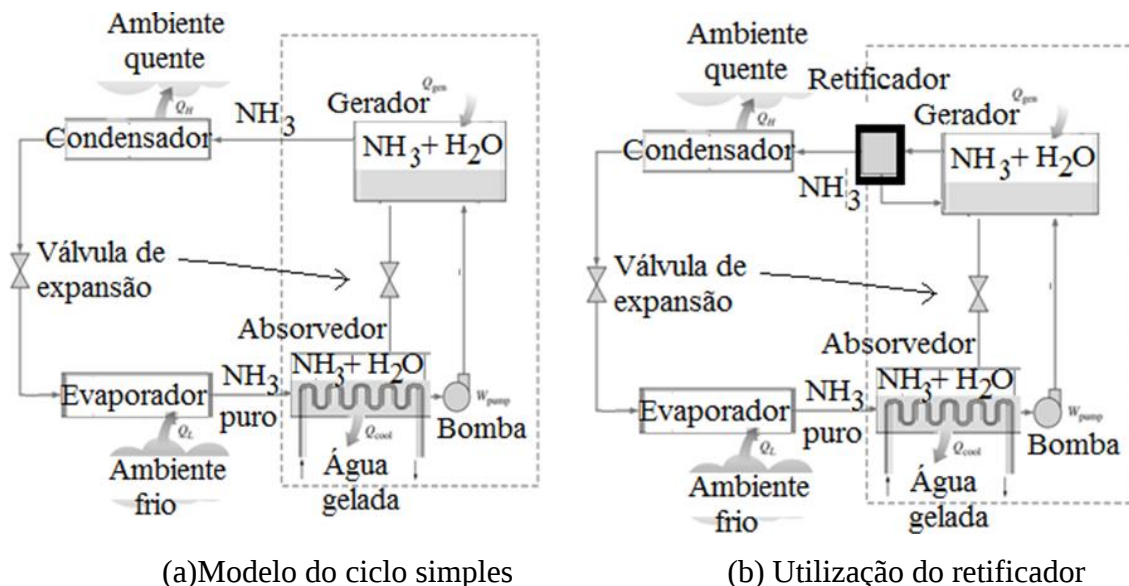


Figura 3.13 Representação dos fluluxo de energia à carga

3.3 Sistema Amônia-Água ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

A Figura 3.14 apresenta os ciclos de refrigeração por absorção que usam a tecnologia amônia-água ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) em duas configurações. Para o sistema de refrigeração $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, a utilização de um retificador torna-se necessário, isso porque, dependendo da energia retirada do evaporador, a presença de água na solução pode acarretar congelamento, obstruindo a tubulação e comprometendo o sistema.



Fonte: Adaptado de Cengel

Figura 3.14 Modelo do Ciclo de Refrigeração por absorção

Em sistemas de refrigeração $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, faz-se necessário o uso de um retificador, pois, dependendo da energia retirada no evaporador, a presença de água na solução poderia congelar e obstruir o equipamento e causar problemas no sistema.

Queiroz (2013) exemplifica o ciclo da Figura 3.14 (a) no qual o vapor de amônia, a baixa pressão, deixa-o evaporar e entra no absorvedor que é absorvido pela solução líquida proveniente do gerador. O processo de absorção é exotérmico, portanto, a quantidade de NH_3 dissolvida em água aumenta a medida que a temperatura cai, necessitando resfriar o absorvedor para retirar a energia liberada conforme a amônia (NH_3) se dissolve, procurando manter a temperatura no absorvedor o menor possível.

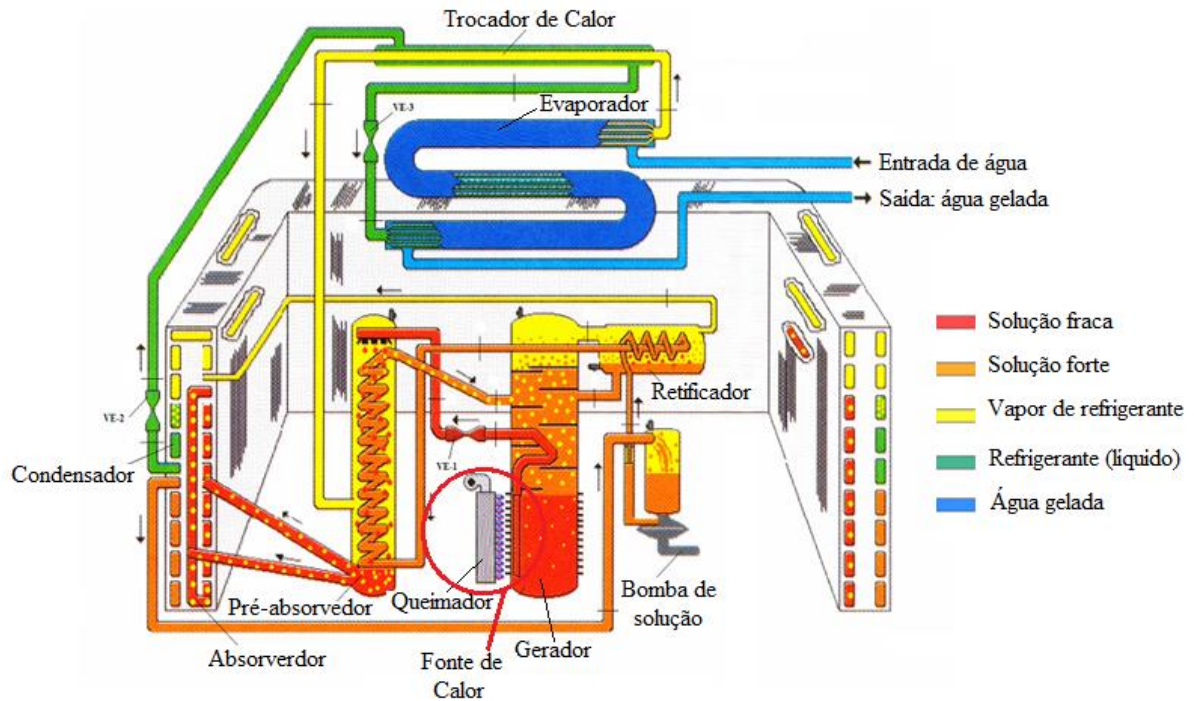
A substância NH_3 apresenta alta concentração na solução que deixa o absorvedor (solução forte) e é bombeada para o gerador que sofre uma transferência de calor de uma fonte a alta temperatura, adquirida pelos gases de escape oriundos do MCI em estudo. Com isso, a NH_3 passa ao estado de vapor, deixando uma concentração fraca de NH_3 . Essa solução fraca retorna ao absorvedor que reinicia o ciclo.

Ao deixar o gerador, o vapor de NH_3 transporta um percentual pequeno de água, entrando no retificador e essa água é condensada com a liberação de calor. O condensado do retificador retorna para o gerador e o vapor quase puro, segue para o condensador.

O condensado deixa o evaporador e expande pelo dispositivo de expansão, seguindo para o evaporador.

A unidade de refrigeração por absorção possui a solução amônia-água ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) como fluido refrigerante, onde a amônia é o refrigerante. O fabricante da unidade é a ROBUR, modelo ACF 60-00 onde é simulado por Queiroz (2013). O diagrama esquemático é obtido pelo manual do fabricante, como mostra a Figura 3.15.

O conjunto unidade de refrigeração e recuperador de calor utiliza três bombas com diferentes finalidades. Uma bomba para a circulação da solução tipo diafragma e outra bomba para a água resfriada no evaporador na unidade. A terceira bomba é usada para o recuperador de calor que bombeará óleo mineral no sistema. A velocidade dessa bomba é controlada por inversor de frequência que possibilita a regulação da velocidade do fluido.



Fonte: Server ROBUR (adaptado)

Figura 3.15 Esquema do ciclo do equipamento fornecido pelo fabricante

Na figura 3.16 o gerador representa a fonte de calor como sendo o queimador alimentado por gás natural. No projeto em estudo, o queimador foi retirado e adaptado para receber os gases de escape oriundos do MCI. As imagens da estrutura original do sistema de refrigeração e o modificado podem ser observados na figura 3.16.



Figura 3.16 – A fonte de calor original alimentando o gerador (a), aberta e adaptada (b) para receber fluxo de calor (c).

O novo sistema de refrigeração modificado passou a obter fonte de calor direto da tubulação dos gases de escapamento, sendo classificado nos arranjos 1 e 3. A figura 3.17 representa o fluxograma do sistema de trigerção composto por refrigeração – trocador de calor – MCI – Usina.

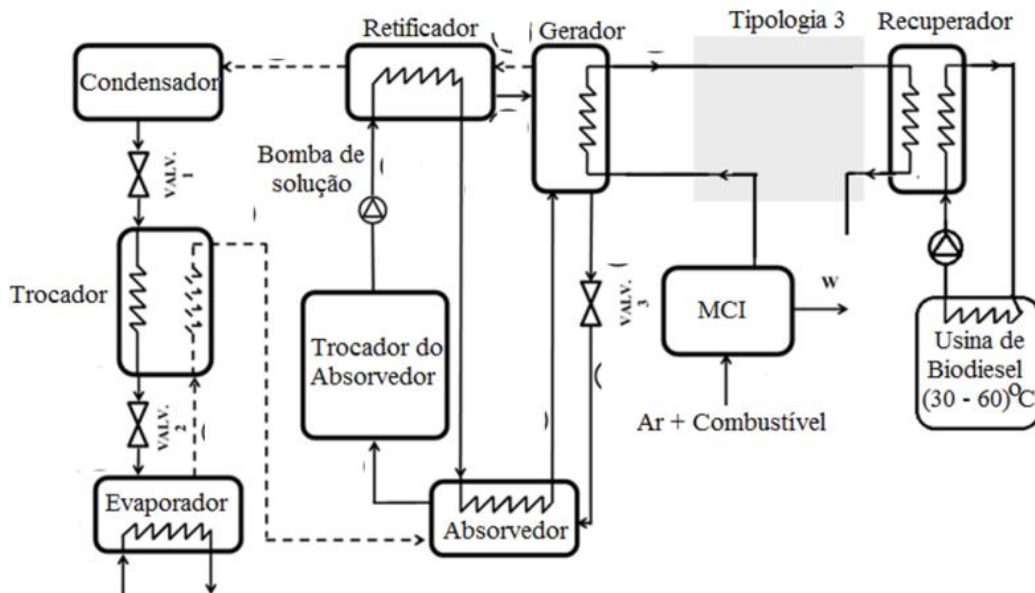


Figura 3.17 – Fluxograma do sistema de trigerção - arranjo 3 (tipologia 3)

Neste sistema em análise é utilizada a solução amônia-água ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) como fluido refrigerante, onde a amônia é o fluido refrigerante e a água o fluido absorvente. No gerador, a solução é aquecida até o ponto de ebulição, produzindo tanto o vapor a alta pressão de solução de amônia como a solução líquida com baixa concentração de amônia também chamada de “solução fraca”.

3.3.1 Gerador de Vapor

O gerador é o equipamento responsável pela vaporização da amônia (refrigerante) da solução pelo fornecimento de fonte de calor. A função principal é realizar a dissorção da amônia na mistura binária $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

A alimentação do gerador é fornecido pelos gases de escape do MCI mostrado na figura 3.18

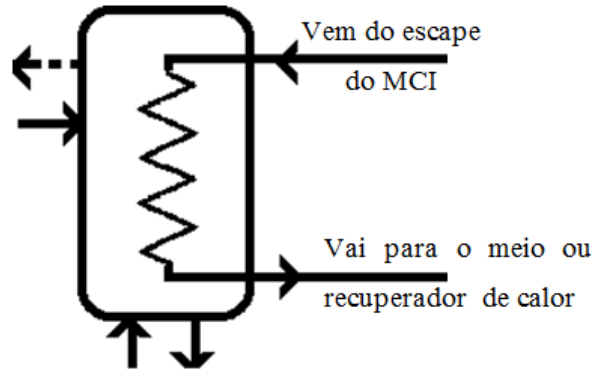


Figura 3.18 - Volume de Controle do Gerador e do Recuperador de Calor

O valor da energia fornecida ao gerador é dado pela equação 3.18

$$\dot{Q}_{\text{ger}} = \dot{m}_{\text{oleo}} \cdot c_{p_{\text{oleo}}} \cdot (T_{19} - T_{20}) \quad (3.18)$$

O gerador de vapor modificado passou a receber inicialmente óleo mineral aquecido do recuperador de calor no primeiro protótipo. Esse recuperador trocava calor com os gases de escape oriundos do MCI. Ensaios realizados traçaram o perfil da eficiência do gerador no sistema de refrigeração.

Posteriormente, o gerador sofreu nova modificação e passou a receber de forma direta os gases de escapamento que possibilitaram novas análises do gerador de vapor e o sistema de refrigeração como todo. Nas duas modificações citadas anteriormente, os gases de escape eram “jogados” no meio ambiente classificados como vapores de processo, tanto pelo recuperador de calor na primeira tipologia de alimentação do gerador de vapor e na segunda pelo próprio gerador de vapor de forma direta.

Em uma terceira e última alteração, os vapores de processos “jogados fora” pelo gerador de vapor (segunda alteração) são reaproveitados no recuperador de calor que utilizará na primeira modificação. Essa nova tipologia possibilita o aquecimento novamente do óleo mineral (pela troca de calor com o recuperador de calor) para ser usado no aquecimento do sistema de aquecimento da usina de biodiesel no tanque de processamento de produção de biodiesel.

3.3.2 Recuperador de Calor

A energia térmica no processo de transferência de calor por convecção ou condução permite de modo indireto, a troca de calor de um fluido a outro, seja líquido ou gasoso, por exemplo. O processo de troca de calor pode ser realizado por um recuperador de calor (classificado também como trocador de calor), A superfície de troca de calor e boa condutibilidade são grandezas físicas importantes na construção de um recuperador de calor.

O processo do recuperador de calor entre dois ou mais fluxos de diferentes temperaturas ocorrem em indústrias, comércio, e aplicações domésticas, afetados por algum tipo de troca de calor. Podem ser classificados como contato direto ou indireto na troca de calor. A operação normal é em torno de 100 °C para pressões de 6 bar., podendo ser empregados em plantas de cogeração. As temperaturas de operação e pressão são entre 100-150 °C e 16 bar. , sendo fundamental para pequenas centrais de energia térmica (WANG, SUNDÉN e MANGLIK - 2010).

O recuperador de calor tem como objetivo o aquecimento ao trocar calor dos gases de escapamento (a elevadas temperaturas), oriundos do motor de combustão interna com o óleo mineral que passa por um conjunto de tubos que aquece e irá abastecer o gerador de vapor da unidade de refrigeração, servindo assim como fonte de calor para o ciclo de refrigeração.

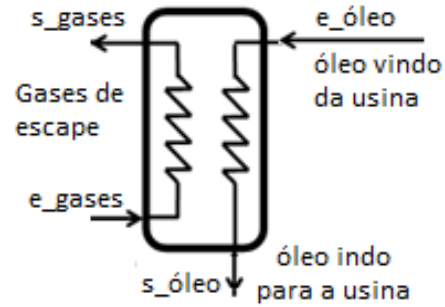
No recuperador de calor da figura 3.19, ligado no sistema de arranjo 2 com o esquema do volume de controle. O fluido que troca calor com os gases de escape passa por um conjunto de 16 tubos de 6 mm de diâmetro interno nos quais são soldados oito blocos de aletas circulares contendo 45 arames de 1,5 mm de diâmetro cada bloco foram instalados na região interna do recuperador pequenos dutos que elevam a temperatura. O óleo mineral irá escoar pelo interior desses tubos no sentido descendente e seguirá para o reservatório da usina de biodiesel. Na região externa a esses tubos aletados passarão os gases de escapamento em contra fluxo ao óleo mineral. Os gases irão entrar por um tubo central e será distribuído de forma a ocupar toda a área interna do recuperador e, por fim, sairão novamente por um tubo central para o meio ambiente.

O rendimento do recuperador de calor é definido como:

$$\varepsilon_{Trocador} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{Max}} \quad (3.19)$$

onde,

$$\dot{Q}_{Max} = \dot{Q}_{gases(MCI)} \quad (3.20)$$



(a) Recuperador acoplado ao MCI – arranjo 2 (b) Volume de controle do recuperador de calor

Figura 3.19 - Representação esquemática do recuperador de calor

O valor da quantidade de calor dos gases $\dot{Q}_{gases(MCI)}$ apresenta duas situações distintas para o rendimento $\varepsilon_{Trocador}$. No arranjo 2, o fluxo dos gases de escape são oriundos do MCI, conforme a equação 3.16. No entanto, para a tipologia 3 o fluxo dos gases são oriundos do sistema de refrigeração, o que é esperado rendimento inferior a essa tipologia. Portanto, o recuperador apresenta dois rendimentos que irá depender do SAD em operação. As equações 3.21 e 3.22 reformulam o rendimento do trocador.

$$\varepsilon_{Trocador(Tip_2)} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{Max}} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{Trocador(Tip_3)} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{Max}} \quad (3.22)$$

$$\dot{Q}_{real} = \dot{Q}_{óleo} \quad (3.23)$$

$$\dot{Q}_{\text{óleo}} = \dot{m}_{\text{óleo}} \cdot C_{\text{óleo}} \cdot (T_{s_{\text{óleo}}} - T_{e_{\text{óleo}}}). \quad (3.24)$$

3.4 USINA DE BIODIESEL

3.4.1 Implementação do Biodiesel

A partir da extração do óleo de gorduras animais e vegetais, o engenheiro químico e professor da Universidade Federal do Ceará Expedito José de Sá Parente criaram no ano de 1977 o processo de obtenção de um novo combustível denominado de “pró-diesel”. A visão do pesquisador era a que para o desenvolvimento da matriz energética dos combustíveis no país, os transportes de cargas pesadas são de óleo diesel.

Fonte de combustível que apresentava como promissora, deixa de ser considerada a produção de óleo diesel vegetal no Brasil, indo na contramão de países como Alemanha e Áustria, que desenvolveram o biocombustível em 1991 e sendo denominado de “biodiesel” (TEIXEIRA e TAOUIL, 2010).

A conscientização dos problemas climáticos e pressões internacionais para um desenvolvimento autossustentável, após um grande período de desinteresse da descoberta do pesquisador (em torno de 30 anos), o governo compreende da importância dessa descoberta. Apontada não só como solução de combustível autossustentável, o investimento no biodiesel também é solução para problemas sociais.

Comparando o biodiesel com o diesel derivado do petróleo, as emissões de gás carbônicos são reduzidas significativamente por serem reabsorvidos no crescimento das plantas que fornecerão a matéria-prima. Outro fator ambiental importante é a redução de fumaça, que acarreta danos a saúde da população (RAMOS *et al*, 2015).

O Brasil é um país mundialmente conhecido na área dos biocombustíveis, porque foi pioneiro no uso de álcool como combustível automotor, o que deu ao país um lugar de destaque nesse cenário dos combustíveis renováveis, que a cada dia se torna um mercado tecnológico muito cobiçado. Hoje também se destaca o biodiesel, que apesar de fornecer em torno de 10% menos energia que o diesel de petróleo, tem um desempenho no motor, no que diz respeito à potência e ao torque, muito próximo ao combustível fóssil, com a vantagem de apresentar maior viscosidade proporcionando melhor lubrificação que o diesel mineral, resultando em um menor desgaste das partes móveis do motor. Além disso, o biodiesel apresenta maior eficiência na queima,

diminuindo substancialmente a deposição de resíduos nas partes internas do motor (LÔBO *et al*, 2009).

O setor de transporte tem reduções nas emissões de CO₂ com o uso de biodiesel puro em substituição ao derivado de petróleo, como o diesel (BRASIL, 2007). Na tabela 3.2, o combustível de fonte renovável exhibe setores importantes no crescimento econômico do país que utilizam o biodiesel a partir de sua implantação em 2005.

Tabela 3.2 – Produção de Biodiesel em alguns setores (10³m³)

Fluxo	Ano								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produção	1	69	404	1.167	1.608	2.397	2.673	2.717	2.917
Transportes	1	69	404	876	1.228	1.864	2.098	2.222	2.364
Rodoviário	1	68	396	858	1.202	1.825	2.039	2.161	2.304
Industrial	0	0	0	22	29	36	59	62	68
Outros	0	0	0	4	5	8	11	11	12

Fonte: BEN, 2014. https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf

Na tabela 3.2, observa-se o crescimento significativo do biodiesel a partir de 2008 decorrente ao fato da obrigatoriedade da mistura de biodiesel puro (100%) ao óleo diesel, indo de 2% entre janeiro e julho, 3% de julho de 2008 a junho de 2009 e 4% em novembro de 2009.

3.4.1 O Biodiesel

De acordo com o artigo dois resolução nº 14 de 11 de maio de 2012 da ANP, biodiesel é definido como:

“... combustível composto de alquil ésteres de ácidos carbílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e ou/esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal, e que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico nº 4/2012 ...”

Nessa definição, reforça-se a aplicação de uma fonte não renovável nos motores de combustão interna, mostrando independência com material fóssil (petróleo) e álcool, que são combustíveis usados em motores estacionários e móveis no Brasil. O biodiesel possui alto valor energético, isento de enxofre e a queima é semelhante ao do diesel.

Existe uma conscientização mundial pela substituição do combustível diesel por uma fonte limpa e renovável como o biodiesel que possui muitas vantagens técnicas quando comparado aos combustíveis fósseis como baixas emissões de gases de exaustão, etoxicidade, biodegradabilidade, originário de fontes renováveis ou matérias primas domésticas, conteúdo negligenciável de compostos sulfurados, alto ponto de fulgor e alta eficiência de combustão. O biodiesel pode ser usado puro ou nas misturas com petrodiesel e sua produção é esperada por encorajar o desenvolvimento econômico nas zonas rurais, promover em longo prazo a substituição dos combustíveis fósseis, reduzir a dependência nacional na importação de petróleo e aumentar a segurança energética (MOSEER, 2009).

Bueno (2006) nos ensaios de misturas de óleo diesel e do éster etílico do óleo de soja mostra a fórmula empírica e o PCI para três misturas parciais.

Tabela 3.3. Propriedades parciais da mistura de biodiesel e diesel (adaptado)

Combustível		Fórmula Empírica	PCI (MJ/Kg)
% Biodiesel	% Diesel		
0	100	$C_{10,80}H_{18,70}O_{0,00}$	43,30
5	95	$C_{11,03}H_{19,16}O_{0,05}$	43,00
20	80	$C_{11,80}H_{20,69}O_{0,22}$	42,06
100	0	$C_{19,75}H_{36,59}O_{2,00}$	37,20

A reação química composta por moléculas de C, O e H representam o radical R' de ácidos graxos e o radical R representa a cadeia carbônica. Ambos radicais R e R' constituem a estrutura molecular do biodiesel (TEIXEIRA, 2010) formando: éster metílico de ácido graxo.



Figura 3.20 – Estrutura molecular do biodiesel

Teixeira e Taouil (2010) afirmam que o biodiesel pode ser produzido por três processos distintos que são: transesterificação; formação de micro emulsões e; pirólise. No entanto, Knothe *et al* (2006) destacam a transesterificação.

Quimicamente, o biodiesel é uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos, metil ou etil ésteres mais frequentemente, obtidos por alcoólise de triglicerídeos presentes nos óleos vegetais ou gorduras animais. As reações de alcoólise são reversíveis e consecutivas, onde 1 mol de acilglicerol reage com 1 mol de álcool e 1 mol de éster é formado a cada etapa na ausência ou presença de catalisador (figura 3.20) (BANKOVIĆ-ILIĆ *et al*, 2012).

O metanol é o álcool mais comum nas reações de transesterificação e neste caso a reação é referenciada como metanólise (VAN GERPEN, 2005). Apesar disso, a etanólise tem sido bastante pesquisada por estimular a produção de um combustível de fonte ainda mais renovável e o Brasil ter vocação nesta produção.

A velocidade da etanólise e o rendimento dos ésteres etílicos de ácidos graxos dependem da razão molar inicial etanol:óleo, tipo e concentração do catalisador, temperatura de reação e intensidade de agitação. Portanto, para desenhar um reator ou desenvolver um processo industrial é muito importante conhecer a influência das condições de reação e operação sobre o rendimento do biodiesel (STAMENKOVIC, *et al*, 2011).

Este processo consiste de um óleo vegetal com a mistura do etanol, dando o éster e glicerol. Essa reação é estimulada por um catalisador, o que melhora o rendimento (GOMES, 2009). A figura 3.21 representa a reação completa do Éster.

3.4.2 Usina de Biodiesel

Na produção de biodiesel da Usina vista na figura 3.22, o processo é realizado por transesterificação. Essa (usina) será alimentada pelo grupo motor gerador no processo de cogeração ou por energia convencional. A parte elétrica do Quadro de Distribuição Biodiesel (QDB) é alimentada pelo QDF. O QDB fornece fluxo de energia elétrica para os motores e bombas da usina e principalmente para as três resistências elétricas que são responsáveis pelo aquecimento do fluxo do óleo que passa pela serpentina e conseqüentemente aquece o processo da reação química numa determinada temperatura, variável necessária para a produção.

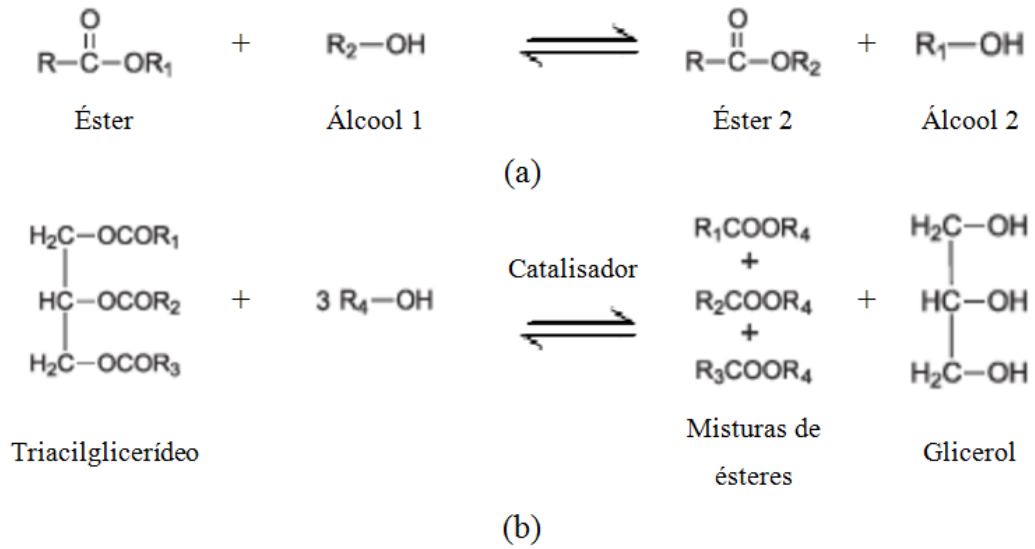


Figura 3.21 – Estrutura química completa do biodiesel



Figura 3.22 – Usina de biodiesel

As resistências elétricas demandam uma potência de 1,2 kW no aquecimento do óleo para obter uma temperatura desejável. Esse óleo, no sistema de cogeração poderá ser aquecido pelo recuperador de calor (ver protótipos 2 e 3) atingindo essas temperaturas desejadas.

Nos ensaios preliminares no Laboratório de Biodiesel do IES, pesquisas realizadas da tese de Silva, E. (2016) por meio de planejamento experimental em esquema composto por cinco variáveis (temperatura, concentração do catalisador, razão molar óleo/etanol, rotação e tempo de reação) constatarem padrões de variáveis. Entre as variáveis estudadas, a temperatura apresenta valores limites de 35 °C - 55°C e de acordo com os ensaios, as reações obtidas apresenta melhor rendimento a uma temperatura em torno de 35 °C.

Portanto, o uso da energia térmica no aquecimento do óleo, propicia economia de energia elétrica em torno de 1,2 kW para o alternador ou a rede convencional.

Para a variável tempo de realização das reações, constata-se que os ensaios se aproximam de valores em torno uma hora e trinta minutos a duas horas, o que é tempo suficiente para se ter autonomia na produção do biodiesel, já que o GMG pode trabalhar a um intervalo de tempo superior a esse.

Entre as vantagens de operação da usina com o grupo motor gerador, essa autonomia de energia elétrica e térmica, não acarreta possíveis interrupções de energia elétrica, caso fosse alimentado com a rede convencional da universidade. Leme *et al* (2015) afirma que historicamente as indústrias brasileiras investem em usinas próprias para evitar instabilidade de fornecimento e de preços. Essas interrupções ocorrem de forma esporádica sem previsões ou avisos, o que gera bastante ônus na produção do biodiesel, já que essa produção, numa falta de energia elétrica convencional ou fornecida pelo GMG seria perdida.

Na melhoria da eficiência da produção na usina, utilizam-se dois inversores de frequência para obter o melhor rendimento. Os ensaios realizados apresentam uma velocidade de agitação em torno de 129 RPM, otimizando assim, a produção de biodiesel por via etanólica a partir do óleo de algodão.

A figura 3.23 (a) retrata a imagem da serpentina que circula o óleo aquecido e na figura 3.23 (b) o reservatório do óleo que constitui a substância em estudo. A figura 3.23 (c) encontrasse o reservatório instalado na usina.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.23 – (a) serpentina que irá circular o óleo aquecido; (b) serpentina instalada no reservatório da reação de transesterização; e (c) reservatório instalado na usina de biodiesel.

CAPÍTULO IV

4.1 MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

Para Tavares (1996), a eficiência do sistema em relação ao seu valor pode ser considerada no quociente da qualidade, sendo agregado a um baixo custo sem citar números.

Os ensaios realizados no SAD iniciam após a realização de manutenções preventivas e, caso seja constatada alguma avaria ou anormalidade de um subsistema, são averiguados as possíveis causas e feita a manutenção preventiva. Os cuidados adotados asseguram proteção aos subsistemas e ao operador, e sua necessidade decorre da complexidade do SAD.

A manutenção detective também se torna necessária. É feito o acompanhamento dos instrumentos no que se refere à leitura analógica, principalmente os parâmetros de pressão, temperatura e rotação nominal do MCI e para o alternador, os parâmetros de tensão e corrente elétrica. Ela também permite a análise de falhas ocultas ou não perceptíveis aos outros tipos de manutenção. Sua principal diferença está no nível de automatização do QGMG como CLPs, sistemas digitais de controle distribuído, *multiloops* entre outros.

Cuidados com equipamentos e instalações de modo geral, muitas vezes são apenas considerados quando um problema ocorre e as consequências se refletem nas anormalidades de produção. Quando ocorre esse tipo de problema, os setores de manutenção, os técnicos especializados e os fabricantes são acionados para desenvolver planos e estratégias emergenciais com o objetivo de resolver o problema de modo rápido. No entanto, esse tipo de manutenção propicia, por conta da urgência em sanar o problema, custos elevados que irão refletir posteriormente com reparos temporários e/ou equipamentos.

Investimentos iniciais visando melhorias para um melhor desempenho energético e prolongamentos de vida útil foram tomados no projeto. Os equipamentos

que constituem o sistema, a preocupação com a proteção à corrosão e a instalação foram medidas importantes tomadas para a manutenção preventiva. Os equipamentos foram pintados com pinturas de proteção à corrosão com plano de limpeza.

Na prevenção preventiva em que se refere a eficiência energética e operacionalidade, a checagem e a limpeza dos equipamentos visa uma melhoria. Estudos realizados no ano de 1997 pela *Pacific Gas & Electric* nos Estados Unidos mostravam que a sujeira nas condensadoras com serpentinas cresciam em mais de 30% o consumo energético do compressor (ALEGRE, 2013).

Os procedimentos de limpeza, bem como as verificações periódicas são realizadas sobre as aletas e tubos das serpentinas. A aplicação de detergente neutro sobre as serpentinas e sua imediata remoção com lavagem de água é suficiente para a remoção dos particulados incrustados

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO MOTOR GERADOR

O objetivo real não é necessariamente aprimorar o sistema na forma simples do processo, mas alterá-lo na forma dos métodos para deixá-lo mais eficiente.

Os subsistemas e seus equipamentos são constituídos por cores de referência, formas e tamanhos padronizados de modo a assegurar e operacionalizar todo o sistema. A disposição dos mesmos permite uma maior segurança e visibilidade.

A proteção dos equipamentos elétricos e térmicos assegura a continuidade operacional do sistema, independente de fatores adversos motivados por panes. Ambos os sistemas, térmico e elétrico são suscetíveis a defeitos de natureza adversa. No setor elétrico, curto circuito e fases abertas de motores são exemplos correntes. No decorrer dos ensaios, a função da proteção é desabilitar a energia quando componentes do sistema apresentar anormalidades de operação, evitando-se danos aos componentes ou em toda a estrutura do sistema.

Relés, disjuntores, fusíveis, sistema de aterramento, chaves *by pass* para fluxo de gás e óleo são elementos de proteção no sistema, atuando muitos deles de modo permanente.

A operacionalidade é local e parte dos acionamentos da rede elétrica e gerador de forma remota. O sistema como um todo tem a pretensão futura de comandar de

forma automatizada e a distância de todo o sistema. Já estão sendo feitos estudos para sua aplicabilidade.

4.2.1 Estrutura do Grupo Motor Gerador

O grupo gerador foi montado sobre base de concreto armado, através de amortecedores do tipo almofada, no qual são dimensionados para suportar esforços estáticos e dinâmicos. O local da instalação tem refrigeração natural com aberturas de entrada e saída.

A figura 4.1 retrata o espaço físico em que está instalado o GMG com aberturas de entrada e saída de ar. Na intenção de manter o local agradável para ensaios, foi instalado um exaustor controlado por sensor de temperatura, que é acionado quando a temperatura em torno do motor se eleva para 40° C, o que produz uma ventilação forçada no ambiente do SAD. O circuito que controla a temperatura permite três níveis: 35°C; 40°C e 45°C.



Figura 4.1 – Instalações do GMG. Detalhe para o circuito de controle no acionamento do exaustor.

Segundo catalogo da Heimer (2012), os GMG abastecidos com gás natural são os mais adequados para aplicações diversas no intuito de reduzir custo, com a utilização de sistemas de combustão em conjunto com controles de ignição e antidetonação. A combustão otimizada permite um melhor desempenho com baixo ruído.

Desempenho e custo são fatores primordiais que são alcançados com a confiabilidade do serviço fornecido na instalação do grupo motor gerador.

Na instalação do combustível, a tubulação de gás é adequada para o volume requerido pelo GMG e constitui um regulador de pressão principal de serviço próximo ao GMG. Após esse regulador, há uma mangueira flexível que o conecta a válvula de solenoide normalmente fechada do gás natural (válvula de corte de segurança) e por último uma válvula¹ de fluxo de gás para a redução da pressão do gás. A instalação do sistema de gás é visto na imagem da figura 4.2.

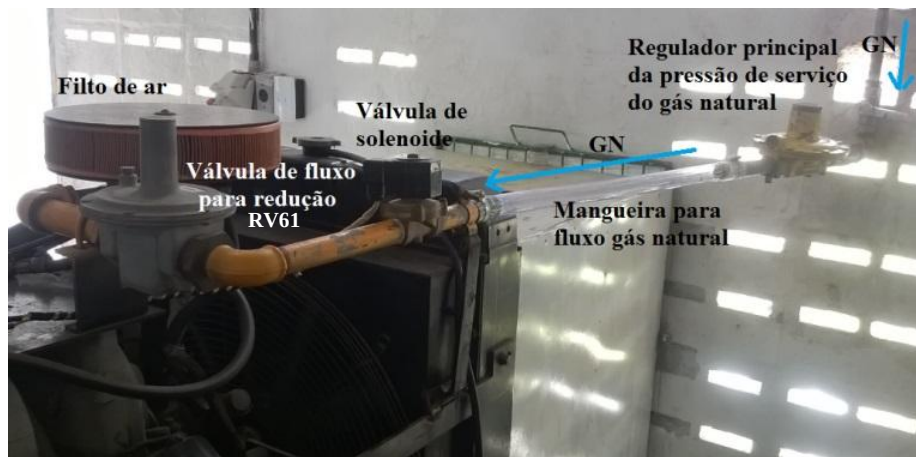


Figura 4.2 – Alimentação do combustível a gás natural ao GMG

Santos *et al* (2012) faz análises com quatro tipos de combustível (gasolina, etanol, GLP e biogás) no grupo motor gerador estacionário com variadas cargas aplicadas. Os autores evitam usar a plena carga por achar que a alimentação em uso não chegaria à plena carga. Para o GMG, o gerador não foi submetido a plena carga por diversos fatores, entre eles, o Laboratório não apresentar estrutura de segurança aos equipamentos e pessoal. No entanto, valores percentuais de cargas foram inseridos para que possam ser analisados em diversas situações de aplicações.

Podemos obter curvas de produção e consumo do gerador. No entanto, esses valores de produção e consumo, bem como os de manutenção e operação não foram levantados por não ver necessidade desses parâmetros para o estudo.

Os fluxos de energia a que são submetidos o GMG são desenhados na imagem da figura 4.3.

A “carga” representada na imagem da figura 4.3 são as elétricas e que foram alimentadas pelo alternador síncrono.

¹ RV SERIES, modelo: RV61

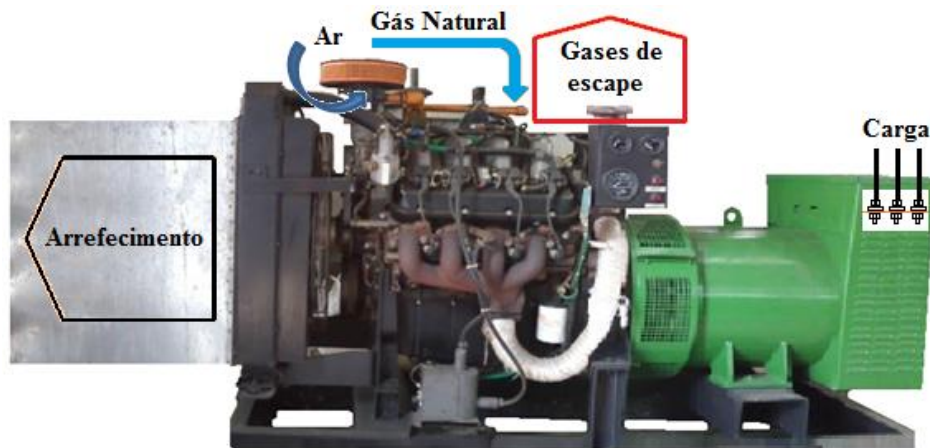


Figura 4.3 – Fluxo de energia térmica e elétrica no GMG

A estrutura das cargas alimentadas pelo gerador é constituída em sua maioria de motores elétricos de potências variadas. Deve-se se ater que a partida desses motores alimentados pelo grupo gerador deve obedecer a uma sequência de ligação para os de maior potência até os de menor potência. Isso permite uma melhor segurança nas cargas, bem como ao GMG.

O GMG possui um Quadro de Comando Automático (QCA) que tem como função, a transferência de carga. O sistema de controle desse quadro é o DPC-560 (no anexo C) e em suas especificações técnicas (do Fabricante), o módulo de controle apresenta quatro funções: controle de partida, parada, transferência e retransferência.

O SAP, sendo considerada uma geração distribuída, pode ser classificado como sistema de autoprodução. A regulamentação para autoprodução de energia já existente na Lei Federal 10.62/03 incentiva a geração do autoprodutor. As reduções, os riscos e suas oportunidades que o produtor se defrontará são alguns fatores que relacionam:

- A confiabilidade do sistema;
- Estruturação da GD; e
- Redução dos impactos ambientais.

Outro fator de grande relevância em qualquer projeto é o custo. No entanto, este trabalho não tratará de custo de projeto por entender que é dedicado exclusivamente a análise operacional e manutenção, ambos desconsiderando valores financeiros em suas aplicações.

4.2.2 Quadros de Operação

Na utilização como fonte alternativa de energia, o GMG necessita de um comando de chaveamento que possibilite a comutação de fontes. O sistema da rede convencional e do GMG são controlados por um comando que assegura a não operação simultânea de ambos os fluxos de energia elétrica. Por normatização das concessionárias de energia elétrica, a chave reversora contém intertravamento mecânico o que assegura a não simultaneidade de operação de ambos os fluxos.

A estrutura desse acionamento para as duas fontes tem o esquema simples de comando mostrado na figura 4.4. Operando como fonte alternativa, o Quadro Grupo Motor Gerador (QGMG) tem uma chave reversora e caso opere como fonte própria, a chave é desconsiderada.

A chave reversora é de três polos e seu acionamento automático constitui de contactores, disjuntores e relés. A não utilização dessas chaves pode acarretar o comprometimento dos equipamentos no retorno da energia da rede convencional e consequências de riscos para as pessoas numa previsível sobrecarga.



Figura 4.4 – Esquema de comando da seleção da alimentação elétrica.

A operação de acionamento do QGMG foi ligada para operar na forma manual, o que deve ficar atento o operador ao acionar o GMG. Uma das medidas é que todas as cargas devem se encontrar desligadas para que posteriormente sejam ligadas. Do contrário, quando o gerador é desligado, as cargas podem continuar ligadas sem problemas para o sistema elétrico, já que a chave aciona automaticamente a rede. Essa medida foi tomada para garantir uma proteção maior nos ensaios realizados, podendo futuramente ser em colocadas no sistema automático de operação para o GMG.

Desde a rede convencional da UFPB e o GMG, até a carga, o sistema de transferência apresenta um par de contactores próximos (e suas proteções) que constituem o QGMG. A rede convencional vem do Quadro Geral de Força (QGF) que recebe também a alimentação do QGMG.

A funcionalidade do QGF é de possibilitar a operação individualizada da rede existente para outras cargas não especificadas, permitindo ensaios, operações de forma independente e protegendo fluxos de energia elétrica como o todo. As imagens e os esquemas de comando dos quadros são reproduzidos nas figuras 4.5 e 4.6.

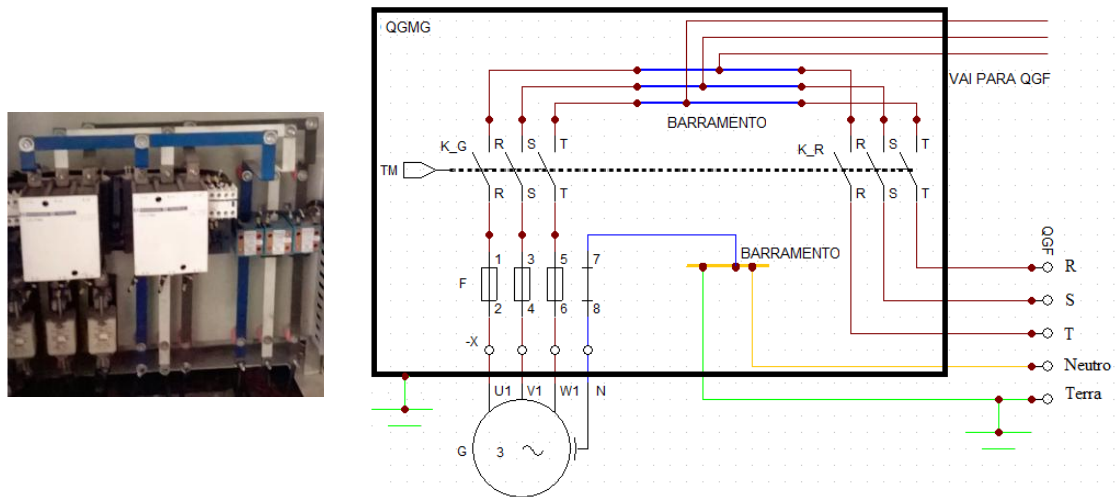


Figura 4.5 – Circuito de Comando Multifilar do QGMG

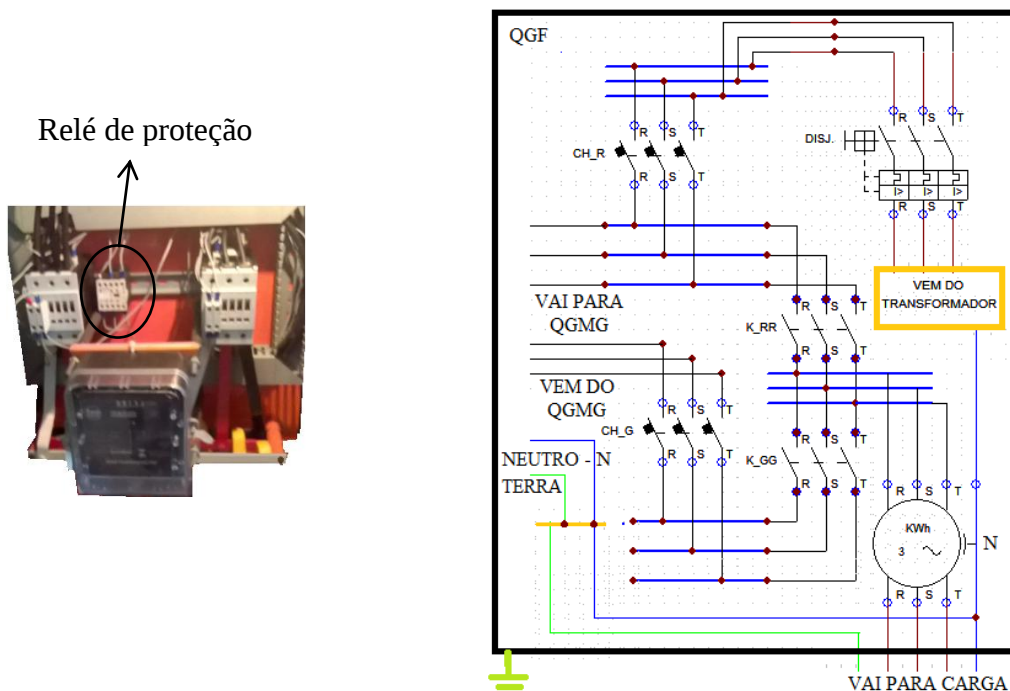


Figura 4.6 – Circuito de Comando Multifilar do QGF

A trava mecânica (TM) visto na figura 4.5, assegura a não operação de ambos os sistemas no fluxo de energia. Para assegurar que ambos os contactores do QGF mostrado na figura 4.6 não operem simultaneamente acarretando um curto no sistema e

eventual pane em toda a estrutura, há um relé de proteção que inviabiliza o acionamento simultaneamente de ambos contactores.

Nos manuais da Confederação Nacional das Indústrias (CNI), Lucariny (1980) classifica o grau de sofisticação da proteção de um equipamento elétrico como função da importância de aplicação. No SAD, o gerador elétrico, o motor de combustão interna e o combustível possuem grau de importância maior que os demais equipamentos. O alternador síncrono possui suas proteções de partida, operação e funcionalidade, bem como o motor de combustão interna. O combustível, entre os citados, possui um sistema de controle de pressão desde a saída dos tanques de gás até a alimentação no motor. Ao operar o combustível, deve-se ficar atento ao nível de pressão que está sendo liberado para que não comprometa as tubulações, que devem estar normatizadas, desde a distribuição do gás até seu destino. Existem dois fatores importantes, o primeiro em relação a pressão a ser fornecida e os riscos a possíveis explosões. As imagens da figura. 4.7 são alguns itens de controle do sistema de proteção e operação do SAP.

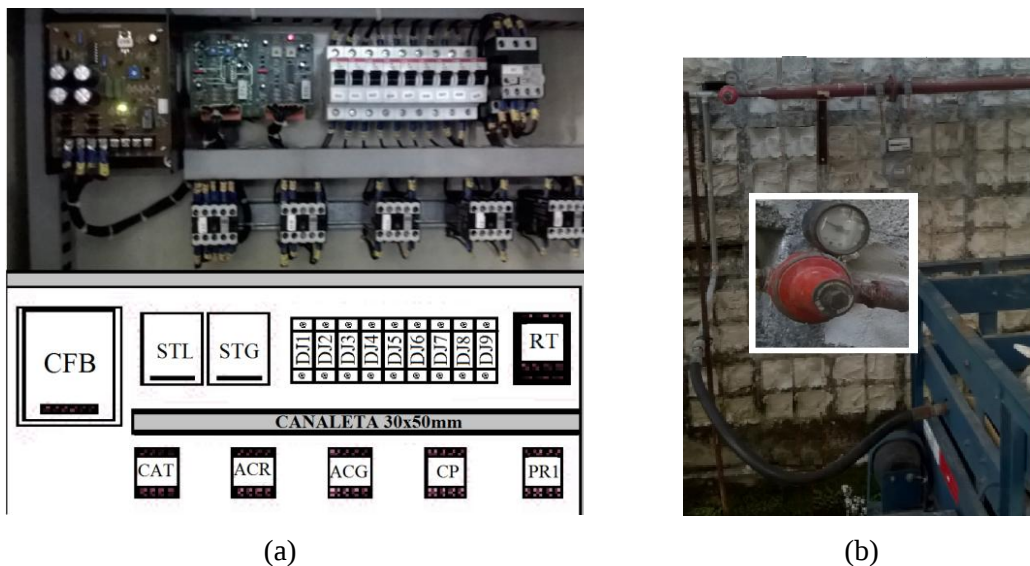


Figura 4.7– (a) Circuitos de acionamento do GMG e (b) válvula de controle do gás natural.

Um dos objetivos do MCI apresentar rotação fixa de 1800 RPM é permitir uma operação satisfatória por conta da frequência em 60 Hz nas cargas conectadas ao fluxo de energia do alternador síncrono. A equação 4.1 relaciona o movimento rotacional com os torques mecânicos da máquina primária e eletromagnético produzidos.

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (4.1)$$

onde:

T_m : torque mecânico (Nm);

T_e : torque eletromagnético (Nm);

$\frac{d\omega}{dt}$: taxa de rotação;

J : densidade de corrente.

A diferença dos torques mecânico e eletromagnético acarreta num torque acelerante de valor positivo para o gerador.

As cargas que são submetidas ao gerador apresentam comportamentos variáveis. Por exemplo, as cargas resistivas (grupo de resistência elétrica instalado na usina) não dependem da frequência. Ao passo que motores são movidos a uma variação que depende da frequência.

4.2.3 Operação do GMG

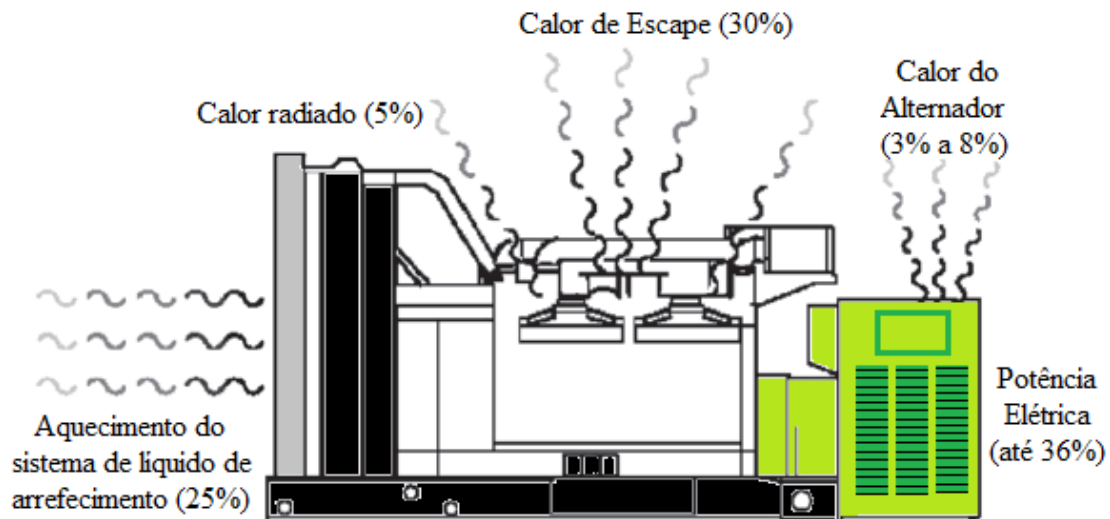
Os ensaios constituem das seguintes etapas:

1. Estabilizar a tensão nominal trifásica do gerador em 380V fazendo a leitura do voltímetro do QGMG ao ser acionada a partida do MCI;
2. Aguardar período de acionamento do MCI até o regime permanente de trabalho, observando a rotação de operação;
3. Acionar o comando de carga no gerador no QGMG;
4. Ligar as cargas de modo contínuo e crescente, observando o comportamento do SAP para alguma irregularidade;
5. Iniciar as medições do SAD;
6. Desligar o QGMG.

4.2.4 Arrefecimento do GMG

O sistema de arrefecimento de um GMG é parte de energia térmica não aproveitada num sistema de geração de energia e que apresenta perdas aproximadas de 25% de sua energia total consumida pelo MCI. A figura 4.8 representa uma distribuição das perdas que constitui um GMG (POWER GENERATION, 2011).

O sistema de arrefecimento do SAD funciona por meio do bombeamento em torno dos cilindros do bloco do motor e cabeçotes. Apresenta uma estrutura fechada que é pressurizada e arrefecida com mistura de água e aditivo.



Fonte: Manual técnico TO30G_PT (POWER GENERATION, 2011)

Figura 4.8 – distribuição das perdas por irradiação para o GMG (adaptado)

O rendimento na transformação da energia química em torque mecânico, como já mencionada, converte pouco mais de 30% e o restante converte em calor. Cabe ao sistema de arrefecimento do motor de combustão interna retirar parte desse calor, reduzindo o superaquecimento e podendo ser reaproveitado como vapores de processos.

A medição dos fluxos dos fluídos de características compressíveis são realizados pelo método do micro hélice utilizando o dispositivo anemômetro. Esse método apresenta velocidade pontual do fluído e permite medir a temperatura. É utilizado para medir a vazão de ar de arrefecimento do MCI nos “furos” de captação (proporcional ao diâmetro da hélice).

As imagens postas na figura 4.9 permite visualizar o duto de saída dos gases de arrefecimento e os pontos medidos. Foi construído um duto para delimitar cinco subáreas da área total da saída do duto de arrefecimento. A necessidade de se fazer esse duto é para obter valores com menor perda possível da vazão do duto.

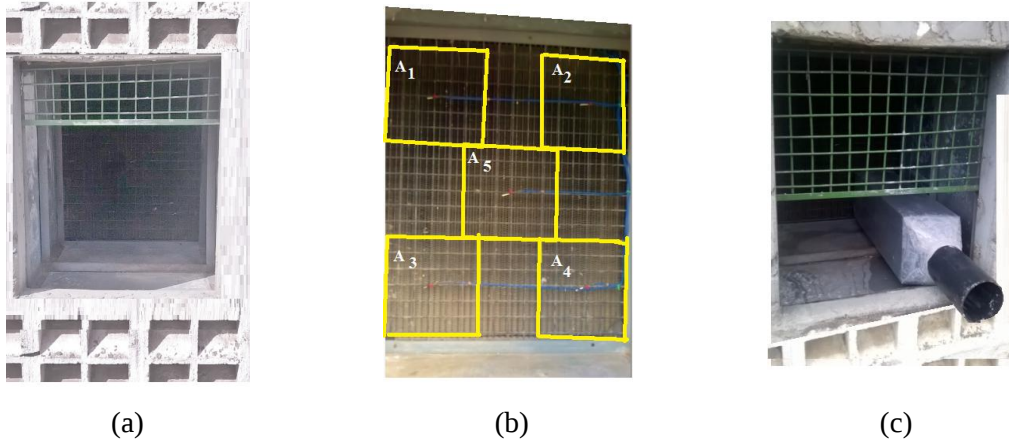


Figura 4.9 – Saída de ar de arrefecimento do MCI (b) subáreas para a medição da vazão do ar de arrefecimento e (c) duto projetado para viabilizar as medições de vazão.

As cinco subáreas foram distribuídas de modo uniforme e numeradas de 1 a 5 (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 e A_5). Em cada subárea foi instalado um termopar tipo K no ponto central. Os valores de temperatura são lidos por um termômetro digital portátil Pentafive que interliga os sensores.

A velocidade e temperatura da vazão das subáreas foram obtidas pelo anemômetro de alta sensibilidade e precisão modelo MDA-20 da Minípa. As medidas são realizadas através do sistema de *Data Logger* com conexão USB (MD-20, 2015). A temperatura aqui medida refere-se ao do equipamento MD-20 e não o Pentafive.

A tabela 4.1 apresenta sete medições realizadas para valores médios de velocidade e temperatura nas cinco subáreas mencionadas. Com esses valores médios é possível determinar a velocidade média final de arrefecimento (V_{arref}) e sua temperatura (T_{arref}) que são respectivamente 12,84 m/s e 35,45 °C.

O quadro 4.1 apresenta os resultados obtidos com a medição do Pentafive. O valor médio da temperatura no arrefecimento é bem superior ao obtido pelo anemômetro. Isso justifica pelo fato de apresentar uma distância significativa do ponto de medição. O anemômetro está a uma distância próxima de 80 cm dos termopares.

A área total do duto de arrefecimento (figura 4.9b) é de 0,35 m² e, com isso, a vazão de arrefecimento é:

$$\dot{V}_{arref} = 0,35 \cdot V_{arref} \quad (4.2)$$

Portanto, o valor numérico da vazão é de $\dot{V}_{arref} = 4,49 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 4.1 – Valores de velocidade e temperatura de arrefecimento

Medição	Vel. (m/s)	Temp. (°C)
1	11,82	37,19
2	11,29	36,73
3	11,12	38,87
4	14,12	34,596
5	14,05	34,67
6	13,1	33,67
7	14,41	32,42
V_médio	12,84	35,44943

Quadro 4.1 – Temperatura em graus Celsius para o sistema de arrefecimento

Temp_Protótipo									
Tempo (min)		15	20	25	30	35	45	50	Media
Medição da Temperatura Termopar_Nº	T_1	48,7	50,2	49,2	48,8	50	47,2	49,6	49,1
	T_2	48,1	48,7	49	49,6	49,9	49,5	49,6	49,2
	T_3	43,2	42,5	42,8	43,4	43,6	43	43	43,07
	T_4	39,7	40,6	40,5	41,1	41,3	41,4	41,4	40,85
	T_5	52,5	51,5	52,5	53,3	53,3	53,1	53	52,74
T_med									46,99

4.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O valor da resistividade do solo é influenciado pelo tipo de solo que tem a capacidade de retenção da umidade, permitindo dispersar correntes sem elevar o potencial além dos níveis toleráveis. Portanto, a resistividade diminuiu à medida que a umidade aumenta.

A resistividade torna-se sensível à intensidade de corrente à medida que se aquece (temperatura aumenta), ocasionando gradientes com potencial elevado. Caso o eletrodo com o contato do solo seja baixo, poderão surgir arcos entre o solo e o eletrodo, prejudicando o sistema de aterramento.

Aurélio e Leon (1978) afirmam que o aterramento é uma função importante sob aspectos de operação no sistema de energia elétrica, contribuindo para proteção e segurança pessoal, melhorando sua operação e a continuidade de serviços. Para Martinho (2011), as condições técnicas do aterramento fora dos padrões normativos, é um dos problemas de geração de harmônicos e de segurança.

O aterramento proveniente da ligação estrela do secundário do transformador (lado de baixa tensão) da rede convencional da UFPB (não havia aterramento, como já mencionado) não compromete o comportamento das cargas. Essas ao serem alimentadas pelo gerador terão a referência do sistema de aterramento no grupo motor gerador. Portanto, ambos aterramentos, tanto da rede convencional, como do grupo motor gerador devem estar nos padrões adequados para não comprometer as cargas em operação, sendo classificados como aterramento de ponto único.

O conjunto de condutores, cabos, conectores e hastes constitui o sistema de aterramento que oferece certa resistência à passagem de corrente elétrica quando aplicada a tensão. A finalidade desse aterramento é manter a tensão da carcaça das máquinas, dos quadros, estrutura metálica em relação à terra em níveis de segurança pessoal, permitindo proteção dos equipamentos e escoando eletricidade estática (gerada por equipamentos ou por indução) para a terra, evitando faíscamento.

4.3.1 Medição de Aterramento

Ao serem energizados pela rede convencional ou por rede própria, devem ser observados os parâmetros essenciais a segurança do indivíduo, bem como dos equipamentos. O sistema de aterramento deve possuir uma resistência de terra satisfatória as normas de segurança. Sendo essa resistência de valor pequeno, fenômenos de descarga e corrente elétricas indevidas fluem para a terra, dando confiabilidade e rapidez na atuação dos sistemas de proteção.

A medição para encontrar a resistência de terra dispõe de dois pontos, onde o primeiro é o que injeta corrente e o segundo numa distância L_{terra} , o retorno dessa corrente. O circuito fechado entre esses pontos produz tensão resultante da corrente que circula e a resistência de terra existente. A medição pode ser realizada por um medidor de resistência de terra tipo *Megger* ou similar. Nesse trabalho foi utilizado o terrômetro digital MTR.

Esse instrumento possui certificado de segurança de acordo com IEC-348 e EN61010 (IEC 1010), Categoria de Instalação III e Grau de Poluição 2. A utilização dos cabos padrão mantém as características de isolamento para a medição de tensão de terra. Há um sinalizador luminoso (LED) que indica se as conexões para a realização de medição estão corretas. Esse aparelho de medir tensão de terra, também denominado

terrômetro, tem o objetivo de assegurar, de acordo com as normas, os valores de segurança de proteção de possíveis danos a equipamentos e principalmente, identificar possíveis fugas de correntes que poderiam ocasionar danos de níveis de categoria leve a elevada no ser humano.



Figura 4.10 – Terrômetro usado na medição de aterramento do SAD.

O tempo de realização de medição para registro e análise de energia deve ser realizado em tempo integral com intervalos consecutivos de 10min. Para situações de interrupção, as medições devem ser invalidadas (CEEE-D, 2010).

O processo de medição é realizado aplicando uma tensão entre a terra a ser medido (primeiro ponto) e o terra auxiliar (segundo ponto determinados por eletrodos fixos) como representa esquema de ligação na figura 4.11 (Mamede Filho, 2007).

Os conectores C1 e P1 consistem dos pontos que deverão ser medidos a resistência da terra, como por exemplo: malha de aterramento; carcaça do equipamento; quadro de energia e outras proteções que apresentam riscos de eletricidade.

O esquema de aterramento apresentado na figura 4.11 é classificado como aterramento de três pontos linear e foi utilizado nesse trabalho. Há outros tipos de aterramento como o de três pontos triangular, quatro hastes quadrilátero ou malha de aterramento.

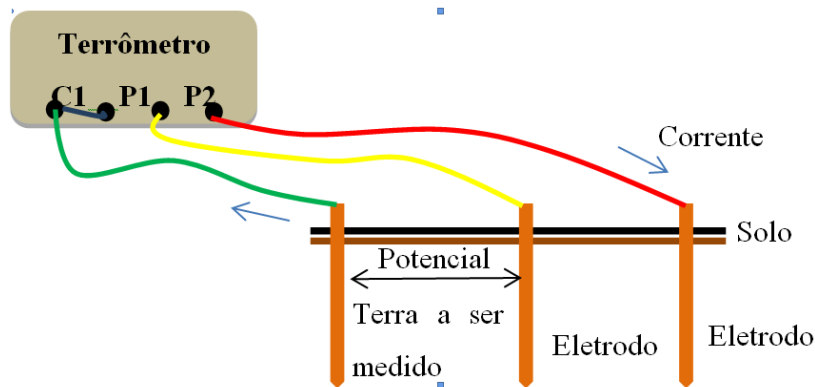


Figura 4.11 – Esquema de ligação de um sistema de medição da resistência de terra.

Os elementos do sistema de aterramento constituem de eletrodos enterrados totalmente na vertical, condutor de aterramento, conexões e condutor de proteção. O condutor de aterramento pode ser constituído de aço galvanizado, aço cobreado, ou outros convencionais. No aterramento realizado na estrutura do grupo motor gerador foram utilizadas três hastes cobreadas de 15mm de diâmetro com 2,4 m de comprimento. O condutor de aterramento seguiu normatização da NBR 5410, que orienta a utilização de cordoalhas com seção mínima de 16 mm^2 para solos não protegidos mecanicamente e com características ácidas que interligam os quadros elétricos e todas as hastes conectadas por elementos metálicos aparafusados. Os condutores de proteção, responsáveis pela ligação das carcaças dos equipamentos, estruturas metálicas e terminais de aterramento são cabos de cobre $2,5 \text{ mm}^2$. Na figura 4.12 são apresentadas algumas imagens da estrutura de aterramento realizadas no local.

4.3.2 Dimensionamento das Hastes de Aterramento

O mais comum num sistema de aterramento é o que ocorre na maioria dos aterramentos domésticos para quadros de medição, tomadas de força e equipamentos que operam a eletricidade, ou seja, são de uma única haste fincada no solo verticalmente. Ao aumentar o número de hastes fincadas em paralelo (ver figura 4.11), a resistência de aterramento tende a diminuir, mas não segue a lei das resistências em paralelo que apresenta saturação a medida que aumenta o número dessas hastes.

O cálculo da resistência de aterramento (R_{elet}) de um eletrodo vertical é dado pela equação a seguir:

$$R_{elet} = \frac{\rho_{solo}}{2\pi L_c} \cdot \ln \frac{400L_c}{2,54D_{elet}} (\Omega) \quad (4.3)$$

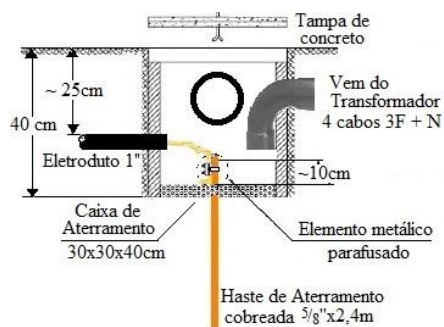
onde:

ρ_{solo} : resistividade do solo (Ωm);

L_c : comprimento da haste cravada no solo (m);

D_{elet} : diâmetro da haste do eletrodo em polegada.

Uma forma mais simples de interpretar a resistência de aterramento é mostrada no gráfico da figura 4.13 definida pela equação 4.4. O valor da Elevação de Potencial de Terra (EPT) decresce à medida que a profundidade da haste aumenta, o que se observa uma menor resistência de terra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.12 – (a) Desenho de Caixa de passagem de aterramento e alimentação vindo do transformador (b) Imagem do aterramento na caixa de passagem. (c) Aterramento do GMG e do (d) Quadro Geral de Força.

$$R_{elet}(\Omega) = \frac{EPT (V)}{Corrente (A)} \quad (4.4)$$

A figura 4.14 mostra a medição realizada a partir da haste fixa (figura 4.12b) para o aterramento principal. Foram realizadas também medições com o QGMG, QGF e componentes que constituem o SAD (máquina de refrigeração, recuperador de calor e outros). Os valores obtidos foram satisfatórios, proporcionando segurança ao SAD.

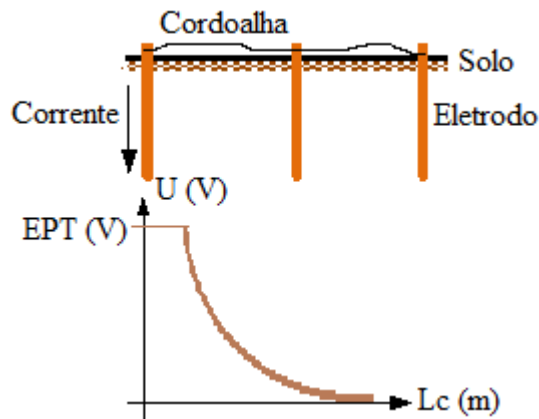


Figura 4.13 – Nível de potencial em hastes de aterramento

$$R_{elet}(\Omega) = \frac{EPT (V)}{Corrente (A)} \quad (4.4)$$



Figura 4.14 – Leitura da resistência de terra

O aterramento mal realizado, fora dos padrões de normatização compromete a qualidade de energia do alternador com toda a carga.

4.4 MEDIÇÃO DA VAZÃO DO FLUÍDO DE ÓLEO

Os sistemas de medição são avaliados para que possam fornecer resultados confiáveis para se tornarem dados a serem gerados pelo sistema. Fatores de viabilidade dos instrumentos podem ser a falta de calibração e os desgastes dos instrumentos. Esses fatores foram corrigidos para que possam apresentar o menor erro de medição possível e que esteja dentro dos parâmetros especificados dos instrumentos.

A diferença entre o valor real da característica medida e a média das medições repetidas é definida como vício (WERKEMA, 2012).

Com repetibilidades nos instrumentos de medidas, valores obtidos resultaram discriminação suficiente nos valores normais.

4.4.1 Transdutores de temperatura

Segundo Bolton (2002), transdutor é um termo que descreve um item de informação em valor de unidade de medida para outra. A necessidade de obtenção de informações para que se tenham medidas compatíveis das grandezas a medir.

Entre essas medidas de projeto, temos as de pressão e de temperatura. O transdutor usado na medição de temperatura foi do tipo termopar. O termopar converte uma leitura da diferença de temperatura num sinal de tensão elétrica. Essa grandeza elétrica passa a ser utilizada como uma medida de temperatura.

A tensão elétrica é originada da diferença de temperatura da junção de duas matérias condutora com características distintas. Esse valor dependerá dos tipos de materiais condutores e da diferença de temperatura (BOLTON, 2002).

Valores de -100 °C a 800 °C são obtidos na combinação dos metais Ferro e Constantan. Para valores de 0 °C até 1600 °C, a platina com liga específica de platina permite trabalhar com temperatura superior. As faixas de medidas de temperatura dependem da combinação dos metais utilizados.

Para um dispositivo de propriedade $P_{prop}(t)$, a informação na forma de função para outra grandeza $X_{prop}(t)$ pode-se relacionar matematicamente na forma de controle estatístico (AGUIRRE, 2013):

$$P_{prop}(t) \approx \propto [x_{prop}(t)] \quad (4.5)$$

A equação 4.5 tem características lineares pelo fato do transdutor em uso trabalhar na região próxima da linearidade, conforme a figura 4.15 a seguir.

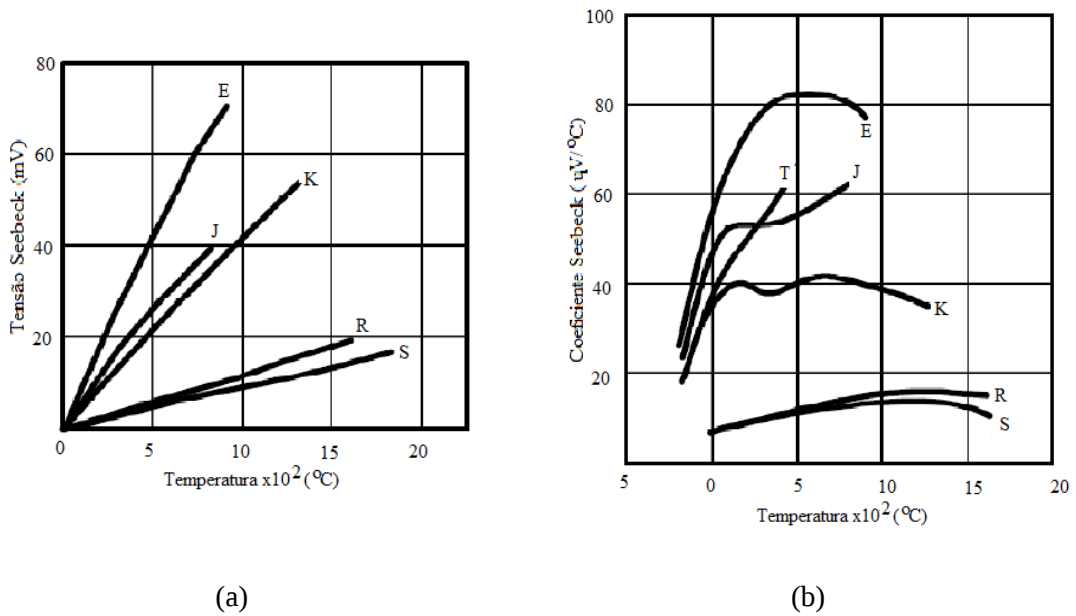


Figura 4.15 – Gráficos referentes a valores de termopar

A faixa de temperatura submetida no SAD está entre o ambiente (em torno de 25 °C) e a de saída de escape do motor de combustão interna (em torno de 500 °C). No gráfico da figura 4.15(a) há regiões próximas da linearidade nos termopares para os níveis de tensão apresentados no eixo e na figura 4.15(b), os valores próximos de uma constante (variação pequena para o coeficiente Seebeck). Portanto, a equação 4.5 se aproxima de uma linearidade. De acordo com Balbinot e Brusamarello (2011, p. 293), “as curvas de calibração dos termopares geralmente não são lineares, mas para a maioria dos termopares usuais pode-se considerá-las lineares”. Essa observação é importante por conta da calibração dos termopares. A equação 4.5 pode ser refeita:

$$P_{prop}(t) = \propto [x_{prop}(t)] \quad (4.6)$$

Os termopares serão instalados nas superfícies das tubulações, após a limpeza da mesma, como lixamento, a utilização de pasta térmica e isolamento térmico de forma a minimizar as incertezas de medição. A figura 4.16 identifica, por meio das imagens, os pontos fixados para a obtenção das temperaturas de entrada e saída dos componentes.

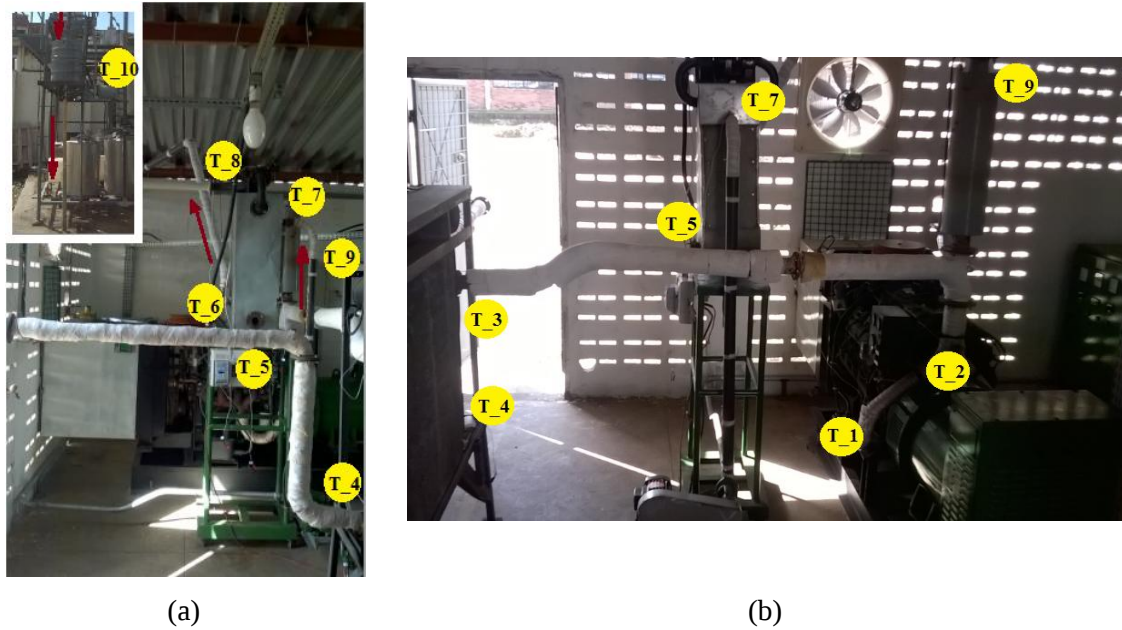


Figura 4.16 – Pontos de medição de temperatura

4.4.2 Medidor de Vazão

O medidor de vazão baseado na medição ultrassônica não intrusiva por tempo de trânsito é constituído por um par de transdutores acopláveis. Fixados na superfície externa da tubulação fechada a ser medida, esses operam como transmissor e receptor, que operam recebendo e transmitindo impulsos de energia (bidirecional) numa determinada frequência. O transdutor piezoelétrico gera e transmite nos fluidos pulsos sonoros, transformando um sinal elétrico numa frequência de vibração mecânica.

A medida por tempo de trânsito é realizada pela diferença de tempo de percursos de um feixe inclinado em relação ao sentido de fluxo do fluido a ser medido. Caso o feixe esteja favorável ao sentido do fluido, as velocidades irão somar e será obtido um tempo necessário para o “transdutor a montante” transporta até o “transdutor a jusante”.

Ao contrário, subtrai quando estiver contra o fluxo, sendo considerado o tempo necessário para o transdutor, a jusante e o transdutor a montante.

Há três métodos de montagem do par de transdutores: o primeiro, método-V, envia e recebe o som duas vezes; quatro vezes para o método-W (segundo método); e no terceiro, método – Z são montados de lados opostos, no qual o som atravessa uma vez a tubulação.

Com o valor da velocidade do fluxo determinada, a vazão do líquido pode ser obtida.

O medidor UFM140 da Fabricante-FMS Plandata CSI Ltda, será utilizado para a medição da vazão dos fluidos de óleo que irá para a usina de biodiesel. Entre os cuidados que foram tomados na medição com o medidor de Vazão Ultrassônico UFM170, o fluido é novo e sem impurezas (no anexo D encontram-se as características desse fluido). A imagem da figura 4.17 é a instalação do medidor de vazão na tubulação de ferro galvanizado com diâmetro externo de 33,7mm e diâmetro interno de 28 mm.



Figura 4.17 – Medida da vazão pelo método V

A escolha do método V na realização da medida é devida ao diâmetro da tubulação do líquido que compreende a faixa de 20mm a 300mm. Para se ter a otimização na medição, a canalização deve ser longa o suficiente para eliminar erros induzidos por fluxo irregular. Tipicamente, este trecho reto do cano deve ser 15 vezes o diâmetro dele. (UFM170, 2009).

Ao realizar a medição, o instrumento de medida informa sobre o comportamento do fluido e a qualidade do sinal. Os valores das medidas estão na tabela 4.2.

O desenho isométrico das tubulações em que o fluido de óleo circula está representado na figura 4.18. O fluxo do óleo é realizado por uma bomba do tipo centrífuga.

As tubulações metálicas ferrosas usadas no protótipo para aquecimento são denominadas de “tubulações de utilidades” para óleos (TELLES, 2007).

Os valores obtidos para a medida do fluxo do óleo foram compatíveis, já que os parâmetros R, S e Q tiveram valores dentro da faixa permitida pelo fabricante.

Tabela 4.2 – Valor da vazão do fluido

$\dot{q}_{oleo} = 0,26l/s$		Faixa de Operação
R^2	97,17 %	$97\% < R < 103\%$
S^3	780,711 %	$600\% < S < 990\%$
Q^4	77 %	$60\% < Q < 90\%$

4.4 ESTUDO DOS GASES

A medição dos gases do MCI em estudo foi realizada pela unidade de controle **PC-MULTIGÁS** onde a transferência de dados para o computador se dá através da interface USB. A medição dos gases pelo analisador de gás, conforme figura 4.19, é baseada no método de medição de infravermelho não dispersivo atendendo as normas NBRs, OIML R99 CLASS 1, ISO 3930 e ASM/BAR 97. Os gases analisados são CO, CO₂, HC, O₂, NO_x.

Os ensaios são iniciados quando o SAD entra em regime de trabalho, levando aproximadamente dez minutos para iniciar as medições. Esse tempo segue orientação do manual técnico do analisador para o MCI. Os ensaios realizados no SAD para a análise dos gases foi o Arranjo 2, que fornece combustível (calor) para a usina.

² Coeficiente de tempo de trânsito verifica se a instalação do transdutor está adequada e se os parâmetros do tubo inserido estão coerentes com os seus valores reais;

³ Indica a amplitude dos sinais ultrassônicos recebidos por um número de três dígitos;

⁴ Quanto maior Q, maior a precisão.

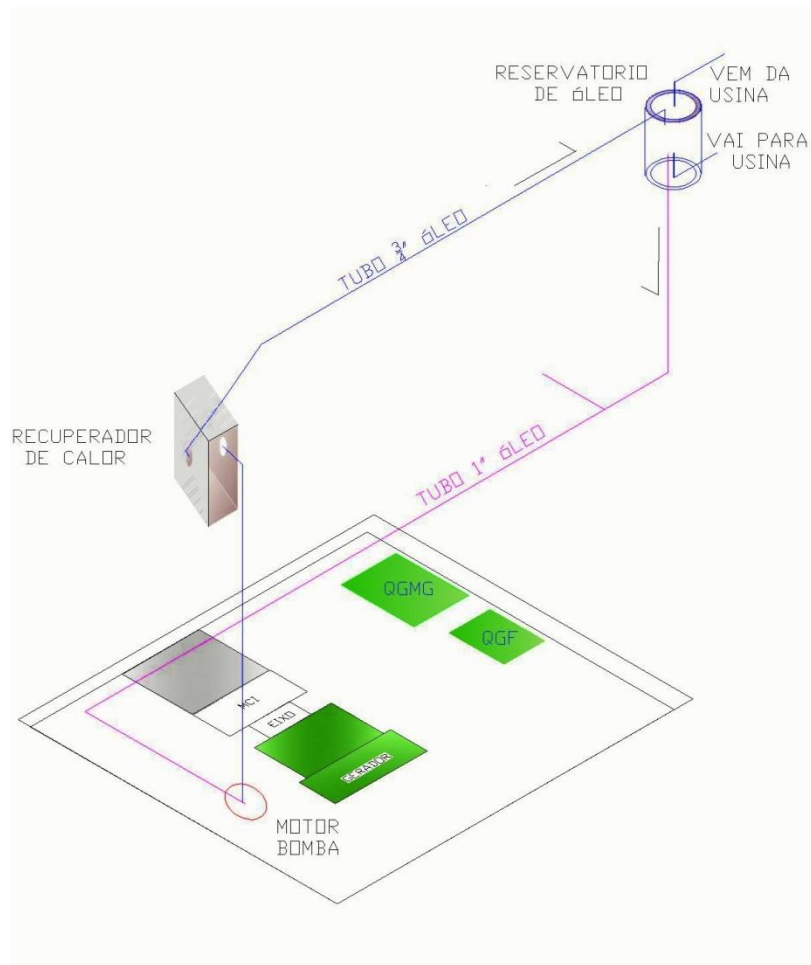


Figura 4.18 – Estrutura da tubulação do fluxo.

As medições das emissões foram feitas no cano de escape do motor logo após o atenuador de ruídos (ponto 9 da figura 4.16), não sendo utilizado nenhum tipo de catalisador para redução dos gases poluentes. O valor da temperatura dos gases de exaustão no início do escapamento (ponto 1 da figura 4.16) do MCI estão a 388 °C. No ponto de medição em que foi colocada a sonda (ponto 9) a temperatura era de 169,56 °C.

A figura 4.20 registra o comportamento do CO₂ e do NO_x no período da medição. No apêndice B são apresentados quadros com os valores obtidos dos ensaios.

Uma observação a ser feita na figura 4.20 são os valores para o CO₂ que foram multiplicados por 10 para melhorar a interpretação do gráfico.

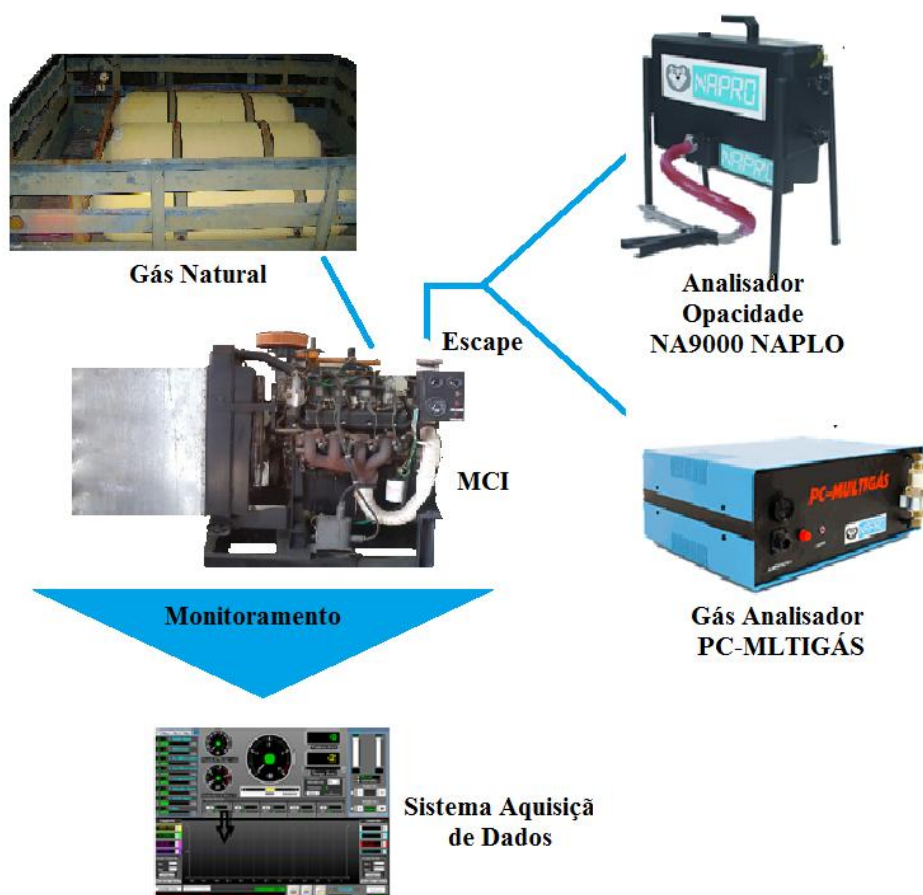


Figura 4.19 – Bancada de ensaio dos gases usando o PC MULTIGÁS

Ponto	CO ₂ (%Vol.)*10	NO _x (ppm Vol.)
1	32	73
2	33	67
3	32	71
4	36	64
5	36	73
6	35	72
7	37	66
8	36	71
9	35	69
10	35	71

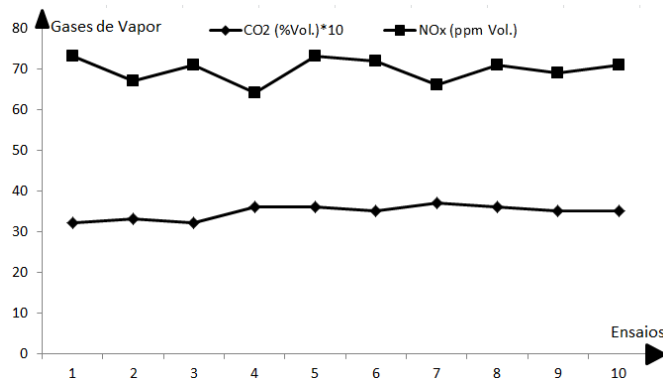


Figura 4.20 – Análise dos gases CO₂ e NO_x

4.5 ESTUDO TERMOGRÁFICO

Nos ensaios realizados, foram feitas análises termográficas do comportamento dos fluxos de calor que constitui o SAD. O comportamento do fluxo para o óleo desde a saída do recuperador até o reservatório na usina de biodiesel, a estrutura do gerador da máquina de refrigeração e o MCI foram alguns dos componentes analisados. As figuras 4.21 e 4.22 são imagens termográficas para alguns elementos que constitui o SAD. O perfil das temperaturas nas imagens não foi obtido, porém vale ressaltar que os pontos mais claros nas imagens fazem referência aos pontos com maior temperatura. O instrumento para a obtenção dessas imagens foi a câmera termográfica da marca FLIR, modelo FLIR A655sc.

Na figura 4.21 a imagem realizada revela a ação da corrente para a partida do MCI. Essa corrente é em torno de 100A e na observação, foi verificado que o terminal negativo da bateria (em destaque) deve ser reparado.

Na figura 4.22b observa-se que o ponto da subárea A₅ detecta maior temperatura. O que é observado nas medições mostradas no quadro 4.1.

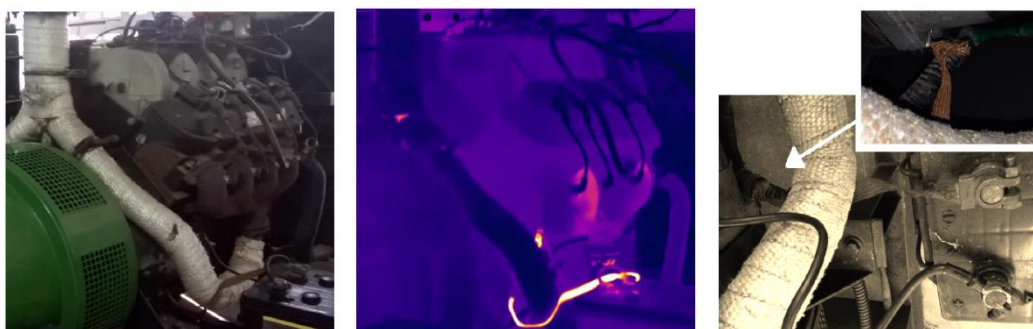


Figura 4.21 – Elevada corrente na partida do MCI

4.6 RUÍDOS

Um GMG é uma fonte de geração de ruídos, que inclui ruídos de ventiladores, arrefecimento, escape e o próprio motor de combustão interna. Portanto, a proteção da audição independente das normas vigentes sobre controle de ruídos deve ocorrer para as pessoas que operam diretamente com o sistema.

Bistafa (2006) afirma que há três principais fontes de irradiação de ruído nos motores estacionário Diesel e Gás natural, que são:

Exaustão dos gases de combustão;

Admissão do ar; e

Bloco do motor.

O ruído da admissão é desprezível comparado aos ruídos do bloco e da exaustão do motor, já que esse motor não tem turbogerador. No ruído do bloco, o nível de potência sonora irradiado é estimado pela equação:

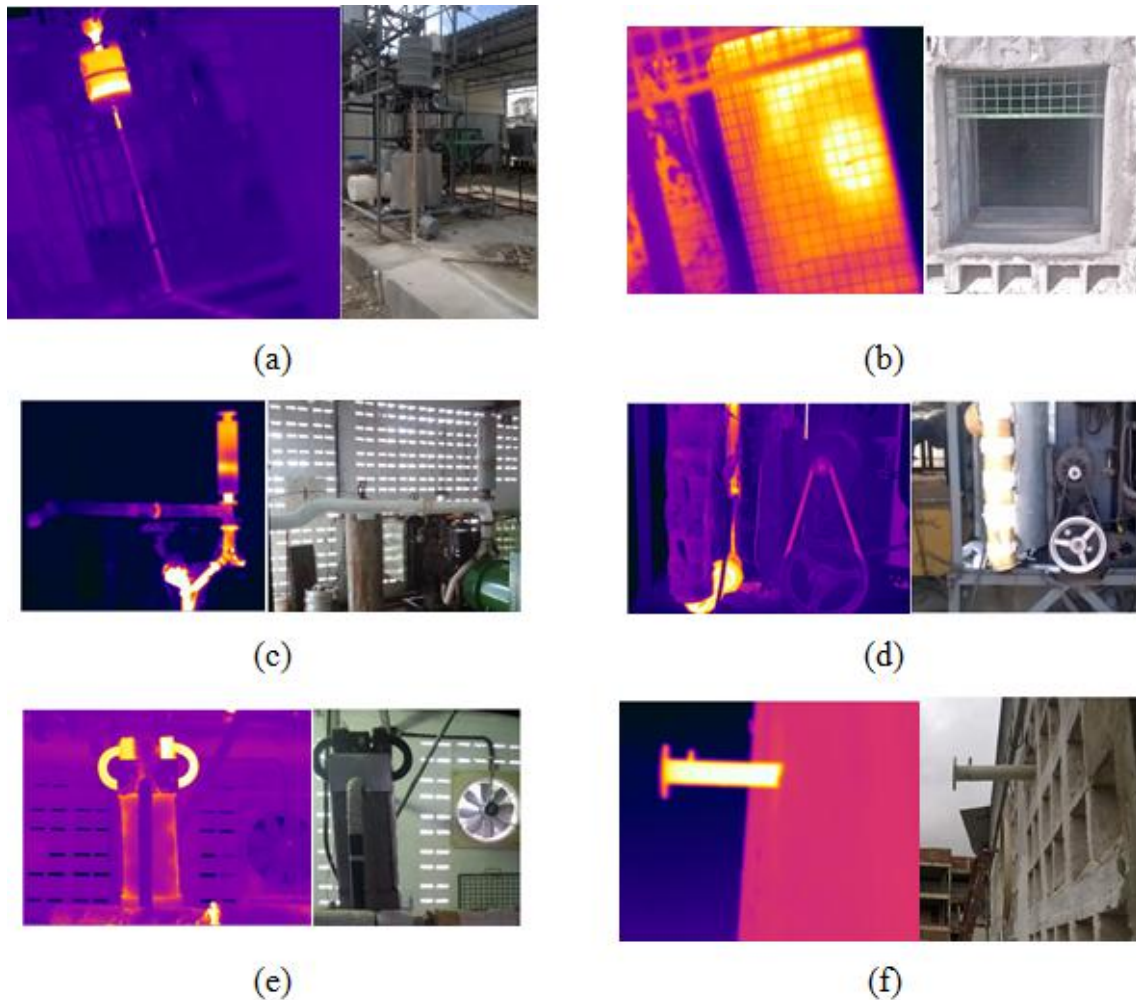


Figura 4.22 – Imagens da termografia do motor de combustão interna em operação.

$$L_w = 10 \log kW + A + B + C + D + 93dB \quad (4.7)$$

onde os parâmetros A, B, C e D correspondem a:

A → fator de correção da rotação;

B → fator de correção do combustível;

C → fator de disposição dos cilindros e;

D → fator de correção de admissão de ar.

BISTAFA (2006) apresenta os seguintes valores de níveis de ruído em dB para:

A = 0 (superior a 1500 RPM);

B = -3 (gás natural);

C = -1 (em V) e;

D = 0 (classificados como outros tipos de admissão de ar)

O nível de ruído de irradiação da exaustão é estimado pela equação:

$$L_w = 10 \log kW - \frac{l_{ex}}{1,2} + 120dB \quad (4.8)$$

onde l_{ex} é o comprimento da tubulação de exaustão dado em metros.

Para o gerador síncrono em estudo, o nível de potência sonora irradiada pode ser estimado pela equação:

$$L_w = 10 \log kW + 6,6 \log RPM + 48dB \quad (4.9)$$

Para o cálculo do nível de ruído do exaustor foi considerado o comprimento da tubulação até a conexão do atenuador de ruído. O valor medido dessa tubulação é de $l_{ex} = 3m$. A potência gerada é de 80 KW na rotação de 1800 RPM. Com isso, temos os valores percentuais do ruído para o MCI e o alternador síncrono, representados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Níveis de Ruído propagado pelo GMG

Equipamento	Nível de dB
MCI	139,43
Alternador Síncrono	88,51

No estudo dos ruídos do ambiente, não foram considerados o SAD que inclui as demais máquinas, sendo considerado apenas o cálculo do GMG.

Conforme Delgado (1991), os níveis de ruídos compreendidos entre 65 e 85 dB podem causar efeitos psíquico fisiológicos no trabalhador que agem no sistema nervoso, podendo causar aumento da pressão sanguínea e dos batimentos cardíacos. De acordo com a Norma Regulamentadora nº 125 brasileira, o ruído contínuo ou intermitente, tem

limite de tolerância de no mínimo 85 dB para oito horas de trabalho, e máxima para risco grave e iminente de 115 dB (BRASIL, 1978).

Constata-se então que o nível de ruído obtido no GMG é bem superior aos regulamentados pela norma. Nos ensaios, teve-se o cuidado para que evitasse esse tipo de condição utilizando protetores oriculares para redução do ruído.

Há estudos para o tratamento acústico a ser dado no SAD e que deverão ser implantados posteriormente.

4.7 ANALISADOR DE ENERGIA TRIFÁSICO TRUE-RMS, CAT III 1000

A operação simplificada de apenas um “clique” auxilia ajustes complicados e processos de dados amplos através do software de ajuste / análise fornecido como acessórios e comunicação direta com o computador através da comunicação RS232 (apresenta dez parâmetros simultaneamente). Interface óptica e software RS-232 com apresentação de forma de onda de corrente/tensão trifásica e análise de harmônicos. O software visualiza a forma de onda em tempo real com medições de Potência KW, KVAR, KVA, PF, Ângulo de Fase, Hz e Energia KWh, KVARh e KVAh (HOMIS, 2015).



Figura 4.23 - Analisador de rede para visualizar o comportamento da geração e consumo de energia (imagem do fabricante HOMIS (2015))

Esse instrumento fornece o comportamento da energia gerada pelo alternador síncrono, bem como o fornecimento de energia as cargas.

CAPITULO V

5.1 OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

Um Quadro Geral foi projetado e implantado para ramificar energia aos quadros de comando do grupo gerador e às cargas. Nesse quadro, a alimentação direta com o transformador e demais linhas de rede de distribuição podem ser isoladas por um disjuntor de capacidade de proteção de 70 A.

A principal necessidade da implementação desse quadro foi a possibilidade de operar isoladamente com a rede da UFPB. No apêndice C são apresentados os procedimentos operacionais nos ensaios e orientações de regime de trabalho permanente do sistema.

5.1.1 Diagrama Multifilar e Distribuição de Cargas

O Quadro Geral de Força (QGF) é responsável por toda a energização nos processos elétrico e térmico do Sistema de Alto Desempenho (SAD), por haver uma chave geral que desenergiza as alimentações que acharem necessárias. A alimentação geral do quadro vem da rede convencional trifásica 380V / 60 Hz do campus da UFPB a partir de um transformador de 75 KVA.

O Quadro Geral do Motor-Gerador (QGMG), responsável pelo “gerenciamento” do GMG recebe alimentação do QGF. A partir de um circuito de comando com botoeira no QGMG, o operador opta pelo modo de fornecimento de energia elétrica a ser fornecido às cargas do SAD, ou seja, a rede convencional ou o alternador do GMG.

Toda a energia elétrica vai para um QGD, responsável pela distribuição de todas as cargas elétricas. No apêndice D são fornecidos os diagramas de operação dos quadros mencionados. As várias cargas como, por exemplo, a usina de biodiesel, o

sistema de absorção água-brometo de lítio, sistema de refrigeração água-amônia, torres de resfriamento e demais possuem quadros de distribuição instalados no setor da carga. Isso irá permitir uma melhor proteção individual para cada sistema e uma menor perda de energia elétrica.

5.1.2. Estudo dos Níveis de Energia do Alternador

As medidas para os níveis de energia fornecidos às cargas foram realizadas em intervalos de cinco minutos com analisador de energia (fabricante HOMIS). Nas figuras seguintes, os valores das potências e o fator de potência para as cargas foram distribuídos em números de medições. O comportamento da corrente e da tensão na saída do medidor de energia também é representado.

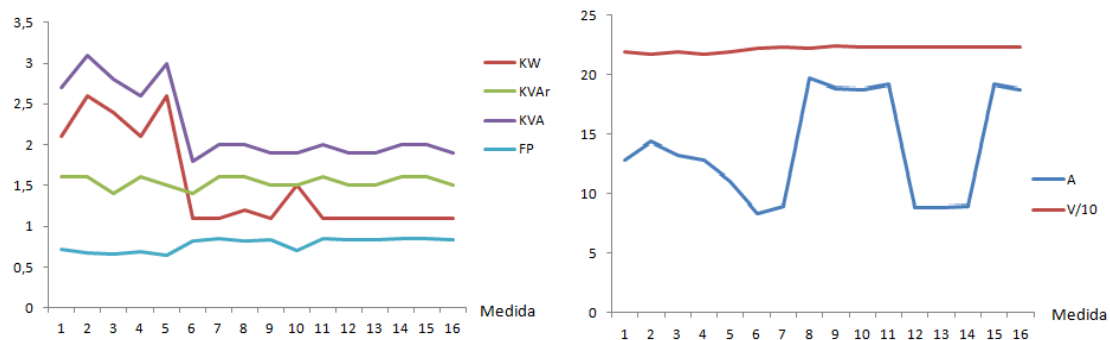


Figura 5.1 – Comportamento dos níveis de energia do arranjo 3 do SAD

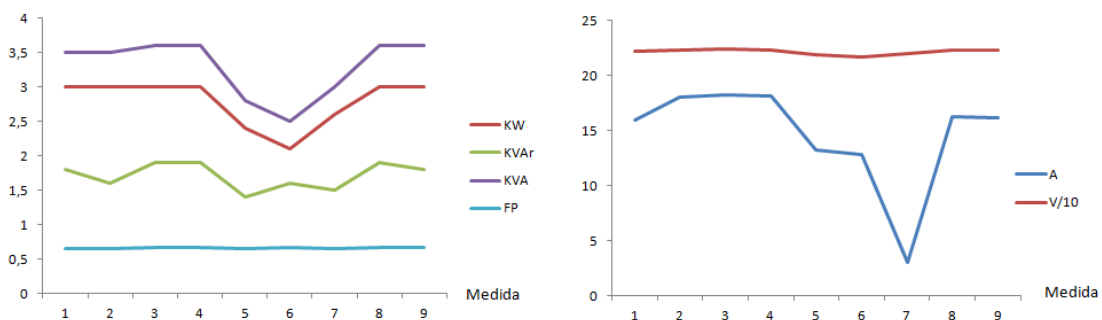


Figura 5.2 – Comportamento dos níveis de energia do arranjo 2 do SAD

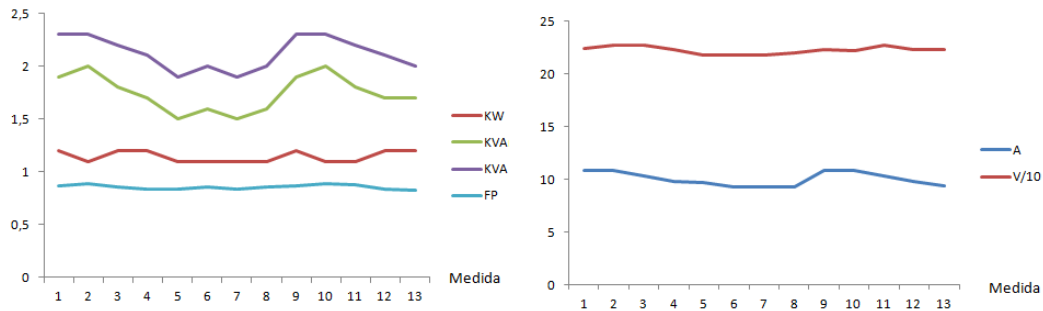


Figura 5.3 – Comportamento dos níveis de energia do arranjo 1 do SAD

Os níveis de tensão de saída dos arranjos são consideráveis estáveis, diferentemente dos valores das correntes que apresentam variações significativas.

No entanto, essas variações da corrente já eram esperadas, por conta das cargas terem características próprias.

No gráfico da figura 5.4 são representados os valores do fator de potência para os três arranjos. Constata-se, portanto que, as cargas nos arranjos não apresentam o mesmo comportamento elétrico.

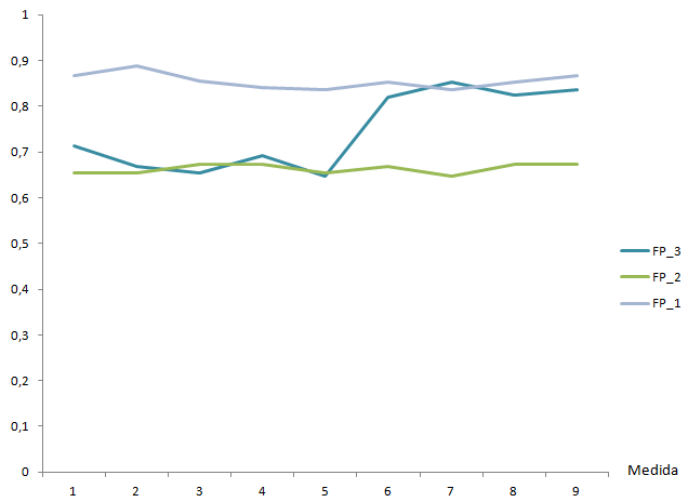


Figura 5.4 – Comportamento da KVA e FP

Os níveis comportamentais do FP para o arranjo três (FP_3) são diferentes dos demais. A justificativa seria a operacionalidade das cargas em relação aos arranjos um e dois.

5.2 POTÊNCIAS DO SAD

5.2.1 – Valores de Temperatura nas medições

Os ensaios realizados para obter os valores de tensão utilizando os termopares ocorreram em intervalos de cinco minutos, totalizando dez medições. Os gráficos a seguir apresentam o comportamento das temperaturas nos três arranjos. Esses valores de temperatura são listados no apêndice E.

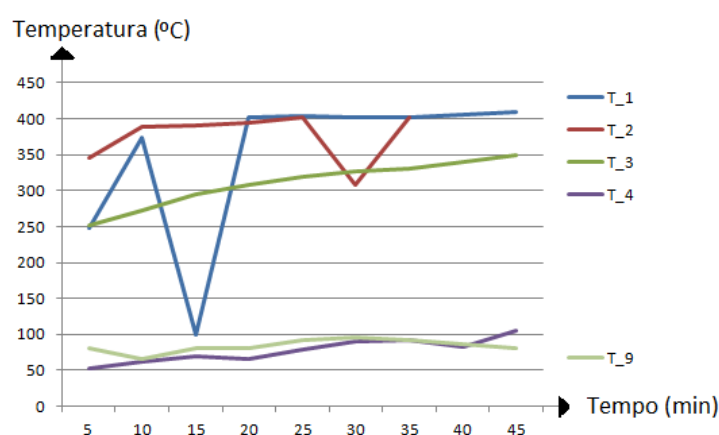


Figura 5.5 – Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 1.

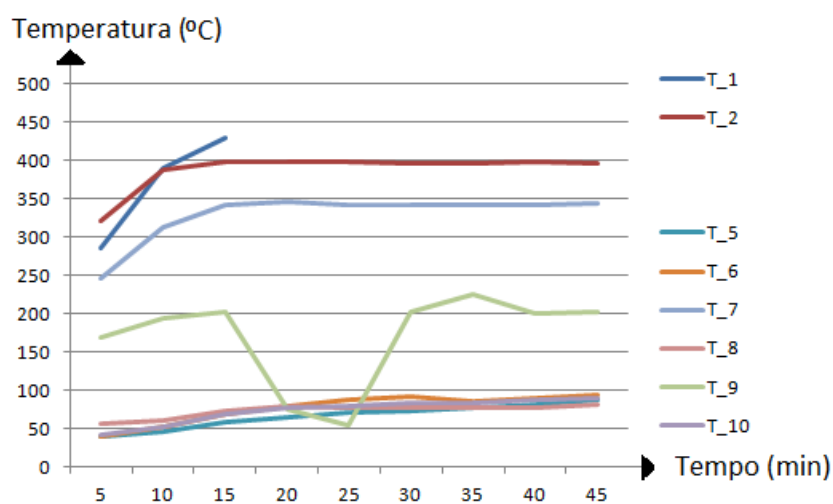


Figura 5.6 – Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 2

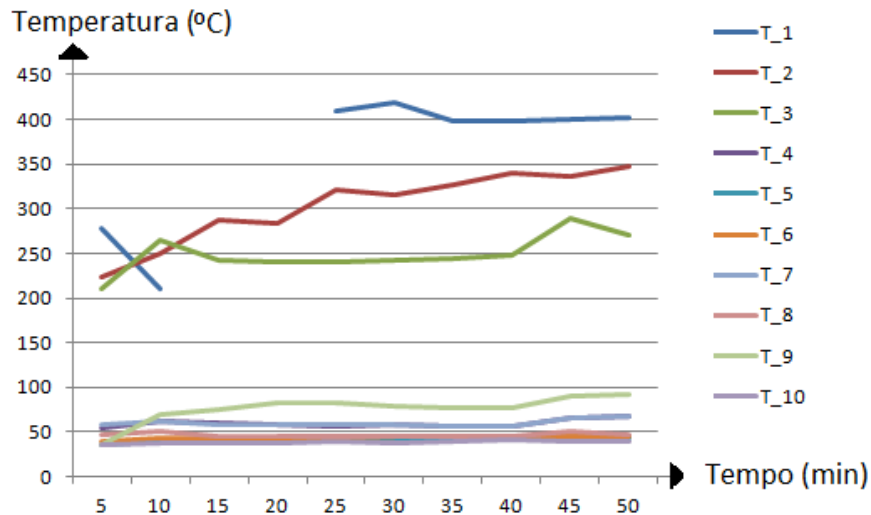


Figura 5.7 – Comportamento das temperaturas no período de ensaio para o arranjo 3

O gráfico da figura 5.8 relaciona o comportamento das temperaturas para os dois arranjos que envolvem a usina de biodiesel. Esses valores de temperatura fazem referência ao termopar 10 (T_10). Os valores de temperatura demonstram que no arranjo três, o fornecimento de energia térmica para o gerador da máquina de refrigeração reduz a temperatura para o recuperador de calor. Essa redução de temperatura, proporciona uma queda térmica de troca de calor com o fluido de óleo da usina.

Os valores de temperatura apresentam uma uniformidade nos valores para o arranjo 3, proporcionando uma adequação melhor do que o arranjo 2. Outra observação é o comportamento constante da temperatura para esse arranjo (três), dando uma margem de trabalho para o controle da temperatura na usina, melhor do que o outro arranjo.

As temperaturas nos pontos de medição variam até se estabilizarem e isso é observado nos gráficos a partir dos 25 minutos de operação do SAD. Para valores de temperatura utilizados nos cálculos das potências, serão determinadas apenas a média dos três últimos valores de temperatura nos arranjos.

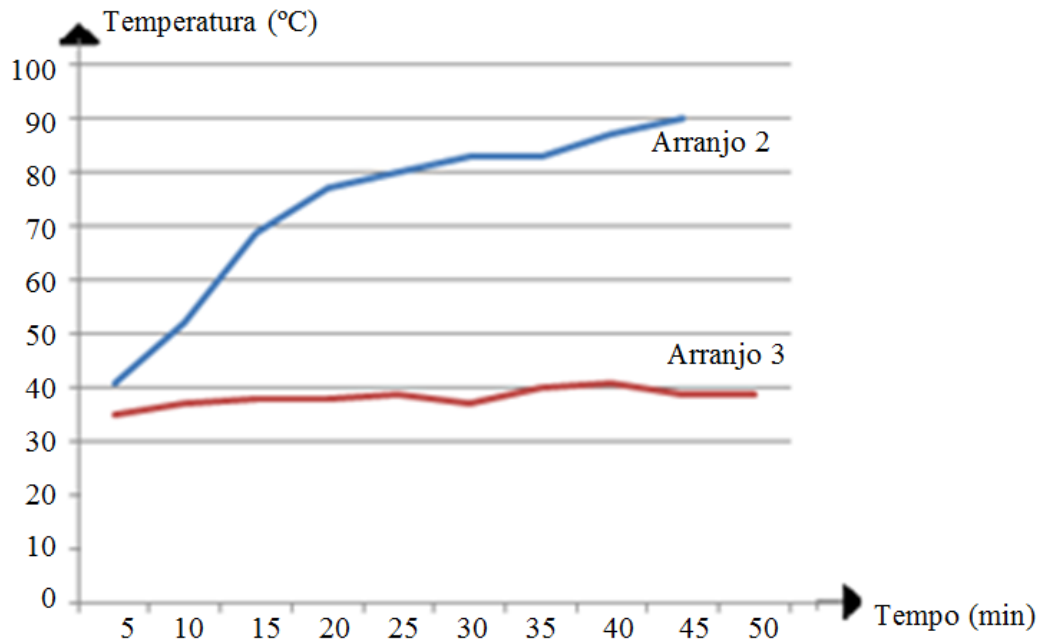


Figura 5.8 – Variações das temperatura no reservatório da usina nos arranjos 2 e 3.

5.2.2 Potência Energética do SAD

Os valores para a potência energética do SAD são relacionados no quadro 5.1

Quadro 5.1 - Valores de potência energética do sistema de cogeração

Potência energética
Gás natural utilizado como combustível no MCI ($\dot{Q}_{GN}$)
Recuperador de calor referente ao óleo ($\dot{Q}_{tip}$)
Gerador do Sistema de Refrigeração ($\dot{Q}_{ger}$)
Arrefecimento ($\dot{Q}_{arref}$)
Vapores de Processo ($\dot{Q}_{vp}$)
Potência do reservatório na usina de biodiesel ($\dot{Q}_{usina}$)
Potência elétrica do gerador ($\dot{Q}_{ele}$)

A resolução das equações referentes as apresentadas no quadro 5.1, necessitam dos valores de parâmetros preexistentes e fornecidos pelo fabricante. Nos cálculos das potências a serem obtidas, são consideradas, quando necessários, esses dados técnicos do fabricante conforme é mostrado a seguir.

Propriedades do Óleo Mineral

- Calor específico: $c_{p_óleo} = 1,6 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$;
- Massa específica: $\rho_{óleo} = 835 \text{ kg/m}^3$;

Propriedades dos Gases de Escape

- Calor específico: $c_{p_gases} = 1,28 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$;
- Massa específica: $\rho_{gases} = 1,15 \text{ kg/m}^3$.

Recuperador de Vapor

O quadro 5.2 apresenta os valores para o óleo e gases.

Quadro 5.2 – Valores de vazão e temperatura do recuperador de calor.

Ramo	Arranjo 2	Arranjo3:
Óleo	Diferença de Temperatura: $\Delta T = 7^\circ\text{C}$	Diferença de Temperatura: $\Delta T = 3^\circ\text{C}$
	Vazão Volumétrica: $\dot{V}_{óleo} = 0,1712 \text{ l/s}$ ($0,0001712 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	Vazão mássica: $\dot{m}_{óleo} = 0,143 \text{ kg/s}$	
Ramo	Arranjo 2	Arranjo3:
Gases	Diferença de Temperatura: $\Delta T = 264,34^\circ\text{C}$	Diferença de Temperatura: $\Delta T = 15,33^\circ\text{C}$
	Vazão Volumétrica: $\dot{V}_{gases} = 0,161 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Vazão mássica: $\dot{m}_{gases} = 0,185 \text{ kg/s}$	

O cálculo da energia para o recuperador de calor é dado pela equação 5.1 a seguir.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = (\rho \cdot \dot{V}) \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

Portanto, os valores da energia para os gases e óleo no recuperador de calor no arranjo dois são:

Ramo dos Gases – $Q_{tip2g} = 62,65 \text{ kW}$;

Ramo do Óleo – $Q_{tip2o} = 1,603 \text{ kW}$;

Os valores da energia para os gases e óleo no recuperador de calor no arranjo três são:

Ramo dos Gases – $Q_{tip3g} = 3,63 \text{ kW}$;

Ramo do Óleo – $Q_{tip3o} = 0,687 \text{ kW}$;

A eficiência do recuperador de calor é obtido pela equação:

$$\varepsilon_{rec} = \frac{\dot{Q}_{oleo}}{\dot{Q}_{gases}} \quad (5.2)$$

Com a equação 5.2 são obtidos os valores das eficiências para os dois arranjos, que são $\varepsilon_{rec_2} = 0,026$ para o arranjo dois e $\varepsilon_{rec_3} = 0,189$ para o arranjo três. Observa-se que a eficiência do recuperador é mais bem aproveitada no arranjo três.

No arranjo dois, quando toda a carga de gases é distribuída diretamente ao recuperador de calor, esse propicia uma eficiência baixa por fornecer em excesso essa carga de vapores de processo. Para o arranjo três, essa carga de vapores já tem perdido um percentual para o gerador de vapor da máquina de refrigeração, fornecendo uma carga de vapores menor ao recuperador.

Na utilização do gerador de vapor, o tipo de SAD em operação independe do arranjo, já que os gases vindos do MCI pertencem à mesma tubulação e vão direto ao gerador. No entanto, o arranjo do SAD irá influenciar no rendimento e eficiência do sistema como todo. Isso pode ser observado no parágrafo anterior.

Os valores medidos nos ensaios em que o gerador de vapor está incluído, a variação de temperatura apresentou valores distintos. Para o arranjo 1 o valor foi de 247°C e o do arranjo 3 de 205°C. Considerando a mesma vazão mássica dos gases de 0,185 Kg/s, os valores para o gerador de vapor no arranjo 1 é $\dot{Q}_{ger_tip1} = 58,53 \text{ kW}$ e do arranjo 3, $\dot{Q}_{ger_tip3} = 48,74 \text{ kW}$.

O valor da potência para o gerador de vapor no arranjo 3 foi inferior ao do arranjo 1, pelo fato dos gases a serem reutilizados no recuperador de calor, produzirem uma perda maior no fornecimento desses gases, indiferente quando os gases são liberados ao ambiente no arranjo 1, sem o reaproveitamento desses.

Os pontos de temperatura a serem usados na usina de biodiesel para o cálculo da “diferença de temperatura” são T_5 (entrada do óleo no recuperador de calor) e T_10

(entrada do óleo no reservatório). Essa forma de medida foi adotada para que o valor final, incluía também as perdas por conta da queda de carga no trajeto desse óleo na tubulação. Esse modo de medida permitiu, por exemplo, observar que no arranjo 3 a diferença da temperatura obtida foi negativa entre os dois pontos de medição mencionadas, conforme quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Valores de temperatura para o reservatório de biodiesel.

Aranjo	Termopar	Temp_médio
2	T_5	82,33 °C
	T_6	89,33 °C
	T_10	86,67 °C
	$\Delta(T_{10}-T_{5})$	°C
3	T_5	43 °C
	T_6	46 °C
	T_10	39,67 °C
	$\Delta(T_{10}-T_{5})$	-3,33°C

A energia da troca de calor dos gases com o fluido de óleo não foi suficiente para manter uma temperatura maior para o ponto T_10 do arranjo 3 em relação ao arranjo 2. Portanto serão considerados apenas os valores do arranjo 2 no reaproveitamento dos gases pela geração de eletricidade. O valor da potência para esse arranjo é de $\dot{Q}_{usina_tip2} = 0,994kW$.

Na energia de arrefecimento do motor de combustão interna, os valores dos vapores produzidos pelo radiador no motor são considerados:

$$T_{amb} = 30^{\circ}\text{C};$$

$$T_{arr} = 46,99^{\circ}\text{C};$$

$$\dot{V}_{arref} = 4,49\text{m}^3/\text{s}.$$

De acordo com os valores das propriedades das pressões dos gases, temos para a temperatura média do ambiente de arrefecimento os valores da massa específica ρ_{ar} e calor específico c_{p_ar} interpolados:

Portanto, a potência de perdas de arrefecimento é dada por $\dot{Q}_{arref} = 84,89Kw$.

A vazão do gás natural em estudo é de $\dot{V}_{GN} = 30,12 m^3/h$ e o seu PCI calculado no capítulo 2, possibilita encontrar a energia fornecida pelo combustível pela equação 5.3.

Quadro 5.4 – Valores de Interpolação para temperatura de arrefecimento

Temperatura (K)	ρ_{ar} (kg / m ³)	c_{p_ar} (KJ/kgK)
300,00	1, 1774	1, 0057
320,14	1, 1051	1, 0070
350,00	0, 9980	1, 0090

$$\dot{Q}_{GN} = PCI_{GN} \cdot \dot{V}_{GN} / (3600) \quad (5.3)$$

A potência fornecida ao gás natural é de $\dot{Q}_{GN} = 306,37 kW$.

As perdas por transferência de calor que constituem o SAD são consideradas nos três componentes que apresentam perdas maiores. Essa escolha é determinada pela averiguação de toda a estrutura do SAD e se constatou que nessa escolha, esses componentes são os principais.

O MCI, o recuperador de calor e o duto de arrefecimento são os três componentes escolhidos. Nos demais componentes da estrutura do SAD, as perdas serão consideradas nulas. Entre os processos de transferências, a convecção no GMG é reduzida pelo processo de ventilação forçada do exaustor em que é acionado a uma temperatura superior a 40°C. Na radiação, as superfícies dos componentes citados anteriormente apresentam temperaturas diferentes do meio e são essas perdas que serão obtidas.

As equações para determinar as perdas por radiação são mostradas a seguir:

$$\dot{V}_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1-2} \cdot [T_{sup}^4 - T_{amb}^4] \quad (5.4)$$

$$\dot{Q}_r = (\dot{V}_r) \cdot A_{sup} \quad (5.5)$$

onde:

ε^1 : emissividade do material a ser trabalhada;

σ : constante de *Stephan-boltzmann* ($5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

F_{1-2} : fator de forma.

As trocas de calor que serão calculadas constituem apenas as superfícies externas ao meio em que estão instalados os componentes. Portanto, o fator de forma é considerado valor unitário.

O instrumento de medição a ser usado é o termômetro infravermelho MT -320 da MINIPA, que é capaz de averiguar energia infravermelha irradiada nas superfícies dos corpos, isso porque emitem energia infravermelha de acordo com a temperatura. O ponto de medida da temperatura é orientado por um sinal infravermelho que é posicionado na superfície central do componente a ser medido.

A figura 5.9 representa o mapeamento dos componentes a serem analisados nas perdas por radiação. Os valores medidos nessas superfícies foram obtidos nos ensaios dos arranjos 2 e 3 (constituem o recuperador de calor) e são apresentados no apêndice F. Os quadros 5.5 e 5.6 apresentam os pontos médios destermicamente por manta de vidro, diminuindo significativamente as perdas por irradiação.

Quadro 5.5 – Valores de Potência nas superfícies irradiadas

		T_médio	Superfície (m2)	Material	emissividade	Tsup(K)	Tamb (K)	Potência (Kw)
T_Motor	Área_1	305,9125	2,205	Ferro preto	0,24	579,0625	303,15	3,120105396
	Área_2	48,9875	1,1025	Ferro preto	0,24	322,1375	303,15	0,034851962
T_Aref	Área_1	36,2475	0,99	Chapa aço	0,45	309,3975	303,15	0,018136294
	Área_2	43,6125	0,99	Chapa aço	0,45	316,7625	303,15	0,040974742
	Área_3	35,16	0,99	Chapa aço	0,45	308,31	303,15	0,014899187
	Área_4	40,08	0,99	Chapa aço	0,45	313,23	303,15	0,02981948
T_Trocador	Área_1	39,24286	0,224	Chapa aço	0,45	312,3929	303,15	0,006161262
	Área_2	77,4875	0,224	Chapa aço	0,45	350,6375	303,15	0,038121061
	Área_3	39,37143	0,224	Chapa aço	0,45	312,5214	303,15	0,006250921
	Área_4	37,95	0,224	Chapa aço	0,45	311,1	303,15	0,00526582
Total (KW)								3,314586125

Entre os dois valores da potência de irradiação, a maior é do quadro 5.5. Portanto será a potência de irradiação escolhida ($\dot{Q}_r = 3,31 \text{ kW}$).

A potência elétrica do alternador é fornecida pelo fabricante da Lion Heimer com um fator de potência de 0,80 ($\dot{Q}_{alt} = 80 \text{ kW}$).

¹ Os valores de emissividade são obtidos a partir da Tabela B-11 (ECKERT *et al*, 1972)

Quadro 5.6 – Valores de Potência nas superfícies irradiadas

		T_médio	Superfície (m2)	Material	emissividade	Tsup(K)	Tamb (K)	Potência (Kw)
T_Motor	Área_1	278,8	2,205	Ferro preto	0,24	551,95	303,15	2,531300795
	Área_2	48,14	1,1025	Ferro preto	0,24	321,29	303,15	0,033158563
T_Aref	Área_1	35,16	0,99	Chapa aço	0,45	308,31	303,15	0,014899187
	Área_2	40,08	0,99	Chapa aço	0,45	313,23	303,15	0,02981948
	Área_3	35,16	0,99	Chapa aço	0,45	308,31	303,15	0,014899187
	Área_4	40,08	0,99	Chapa aço	0,45	313,23	303,15	0,02981948
	Área_5	35,16	0,99	Chapa aço	0,45	308,31	303,15	0,014899187
T_Trocador	Área_1	49,98	0,224	Chapa aço	0,45	323,13	303,15	0,014038914
	Área_2	47,42	0,224	Chapa aço	0,45	320,57	303,15	0,012087776
	Área_3	45,9	0,224	Chapa aço	0,45	319,05	303,15	0,010951189
	Área_4	37,66	0,224	Chapa aço	0,45	310,81	303,15	0,00506649
Total (KW)								2,696041063

Com as potências energéticas obtidas, são calculados os percentuais de todas as potências do SAD, com a potência primária fornecida pelo combustível a gás natural. O quadro 5.7 mostra os valores em percentuais para essas energias e seus rendimentos.

Os valores das perdas adicionais (não calculadas) são fatores físicos, químicos e considerações na realização dos cálculos. Outro fator a ser levado em consideração são os dados fornecidos pelo fabricante. O MCI perde a potência de 1% a cada 5°C para temperaturas acima de 40 °C, ou seja, a potência do combustível garantida é de até 40 °C.

Quadro 5.7 – Demanda de Energia Total

Parâmetro	Potência energia (kW)		Energia (%)	Arranjo 1 (%)	Arranjo 2 (%)	Arranjo 3 (%)
Combustível	Q_{GN}	306,37	100			
Arrefecimento	Q_{arref}	84,89	27,71	27,71	27,71	27,71
Irradiação	Q_r	3,31	1,08	1,08	1,08	1,08
Usina	Q_{usina}	0,99	0,32		0,32	0,32
Alternador	Q_{alt}	80	26,11	26,11	26,11	26,11
Recuperador	Q_{tip2g}	62,65	20,45		20,45	
	Q_{tip2o}	1,603	0,52		0,52	
	Q_{tip3g}	3,636	1,19			1,19
	Q_{tip3o}	0,687	0,22			0,22
Gerador de vapor	Q_{ger_tip1}	58,53	19,10	19,10		
	Q_{ger_tip3}	48,74	15,91			15,91
Demanda Total (%)				74,33	76,20	72,54
Perdas adicionais (%)				25,67	23,8	27,46

A exergia química é obtida a partir da equação 3.11, onde o parâmetro ϕ da equação sugerida é igual a 1,04 para o gás natural (KOTAS, 1985). Esse parâmetro também é sugerido em várias literaturas que abordam os cálculos da exergia química. Sendo desprezadas as exergias física, cinética e potencial como já mencionados anteriormente. Portanto, o valor exergético total do combustível é dado por $\dot{ex}_{comb}^{qui} = 318,62kW$.

A exergia gerada é distribuída pelo MCI através do calor, trabalho e os produtos da reação da combustão. Considerando que a potência elétrica gerada pelo GMG pelo acoplamento do MCI ao alternador é o trabalho aproveitado em todo o sistema, e, a transferência de calor e os gases oriundos do escapamento são as perdas totais. As perdas não calculadas são consideradas como as de atrito, de acionamento e bombeamento dos fluídos.

O cálculo da eficiência exergética do SAD da entrada do motor (combustível) a saída da geração de eletricidade pelo alternador e a potência gerada a partir dos gases de vapor para os dois arranjos 1 e 2 são dados nas equações 5.6 e 5.7 (TAILLON, BLANCHARD, 2015). O calor produzido pela energia térmica dos gases de exaustão ao gerador de calor nos arranjos 1 e 3 são os mesmos e, portanto a eficiência para ambos os arranjos é a mesma.

$$\dot{\epsilon}_{SAD_{1,3}} = \frac{\dot{Q}_{alt} + \dot{Q}_{ger}}{\dot{ex}_{comb}^{qui}} \cdot 100 \quad (5.6)$$

$$\dot{\epsilon}_{SAD_2} = \frac{\dot{Q}_{alt} + \dot{Q}}{\dot{ex}_{comb}^{qui}} \cdot 100 \quad (5.7)$$

De acordo com Dincer e Rosen (2012) ou Çengel e Boles (2006), a transferência de exergia pelo alternador é a própria energia elétrica. Na geração térmica, o valor exergético também passa a ser considerado como os calculados sem que haja perdas e o trabalho seria todo reversível.

O valor a ser obtido, portanto é de:

- $\dot{\epsilon}_{SAD_{1,3}} = 26,114\%$; e
- $\dot{\epsilon}_{SAD_2} = 26,114\%$.

5.2.3 Potência Exergética do SAD

A formulação do balanço exergético é determinada de acordo com a forma aplicada de estudo. Para um volume de controle em regime permanente a equação 5.8 mostra os parâmetros de transferência de energia na entrada e na saída (Moran et al, 2014).

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q}_j - (\dot{W}_{VC} - p_o \frac{dV_{VC}}{dt}) + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} - \dot{E}_d \quad (5.8)$$

A equação representada com as transferências de exergia na entrada (e_{fe}) e saída (e_{fs}) constitui a energia de qualidade, convertida em qualquer forma de energia ligada à energia entálpica.

Como o projeto desenvolvido é em regime permanente, as taxas da energia do volume de controle (E_{VC}) e do volume do fluido (V_{VC}) são nulas. Portanto, a nova equação é dado por:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} - \dot{E}_d \quad (5.9)$$

Os termos da equação 5.9 e_{fe} e e_{fs} são as exergias por massa e podem ser denominados como exergia específica de fluxo. A diferença dessas exergias associadas ao estado de escoamento de um fluido é expressa pela equação 5.10

$$e_{fe} - e_{fs} = (h_e - h_s) - T_o(s_e - s_s) + \frac{V_e^2 - V_s^2}{2} + g(z_e - z_s) \quad (5.10)$$

Para Moran et al (2014), a exergia é uma contribuição da termomecânica e da química. Os gases de combustão oriundos do MCI passarão através do recuperador de calor e/ou do gerador de calor. Ambos são considerados para efeitos de cálculos, volumes de controles em regime estacionário.

Considerando os valores da energia potencial e cinética desprezíveis para efeito de cálculo, uma nova equação é apresentada.

$$e_{fe} - e_{fs} = (h_e - h_s) - T_o(s_e - s_s) \quad (5.11)$$

O ar na condição de gás ideal será considerado o produto da combustão e a temperatura de estado morto (T_o) tem um valor estimado em 25°C em uma pressão ambiente de 1atm ao longo do processo. A vazão de massa do ar já mencionada nas seções anteriores é de $m = 0,185 Kg/s$.

No arranjo 1, o fluxo dos gases de combustão são injetados no gerador de calor para produzir frio. As temperaturas de entrada e saída, conforme figura 4.16a são respectivamente $T_3=310,33^\circ C$ e $T_4=77,44^\circ C$ (ver Apêndice A). Substituindo os valores de entalpia e entropia conforme tabela dos gases ideais no anexo B e a vazão mássica dos gases, o valor líquido exergético (e_{ger_1}) no gerador de calor é dado por: 15,37 KW.

Na estrutura do arranjo 2, os valores de temperatura para o recuperador de calor são $T_7=329,22^\circ C$ e $T_8=73,89^\circ C$. Consultando os valores de entalpia e entropia na tabela dos gases, o valor líquido exergético (e_{rec_2}) do recuperador de calor é dado por: 17,30 KW,

No último modelo do SAD, o recuperador e o gerador estão presentes e seus valores de temperatura de entrada e saída no volume de controle podem ser obtidos na tabela A.3 do apêndice. Com os valores substituídos, a exergia para o recuperador de calor (e_{rec_3}) é de 0,25 KW e do gerador de calor (e_{ger_3}) de 10,43 KW.

A exergia no gerador de vapor apresenta uma queda de 15,37 KW para 10,43 KW na utilização do arranjo 3. Para o recuperador de calor, o reaproveitamento do gerador de calor em sua alimentação também tem uma queda significativa.

5.2.4 Diagramas de Sankey e Grausmann

Para representar os valores obtidos nos ensaios e melhorar a compreensão a partir da visualização, são representados diagramas de Sankey e Grassmann.

5.2.4.1 Diagrama de Sankey

No diagrama de Sankey são representados os valores de fluxo de energia desde a fonte primária de energia até o consumo final. De modo visual, a largura do fluxo caracteriza a quantidade de energia desde a entrada até a saída.

Nas figuras de 5.9 a 5.11, os diagramas representam a quantidade energética para cada arranjo estudado.

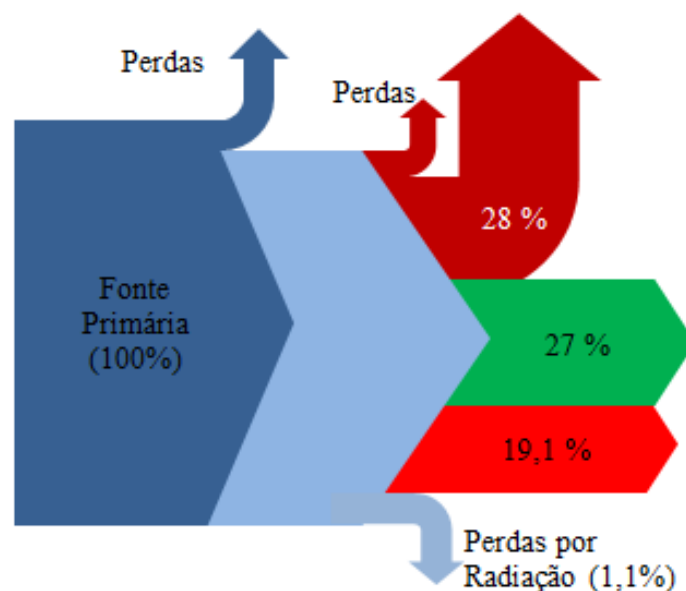


Figura 5.9 - Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 1

Os subsistemas que são contemplados no arranjo 1 são o alternador que corresponde a 27% de toda energia de entrada, 28% do sistema de arrefecimento que no projeto não é contemplado e 19.1% de energia térmica para a produção de frio.

Esse arranjo é classificado como um sistema de cogeração, no qual são reaproveitados apenas os gases de escape do MCI para a produção de frio. Os valores de 1,1% são considerados como perdas por radiação nos três arranjos. As demais perdas que são identificadas apenas como fluxo de energia sem percentuais podem ser consideradas, por exemplo, como fluxo de óleo na refrigeração e lubrificação do MCI.

Para os subsistemas que são contemplados no arranjo 2, o aproveitamento dos gases de escape são usados para produção de calor na usina de biodiesel. O alternador corresponde a 27% de toda energia de entrada, 28% do sistema de arrefecimento que no projeto não é contemplado e 21% de energia térmica para a produção de calor (finalidade de aquecimento do óleo) através do recuperador de calor.

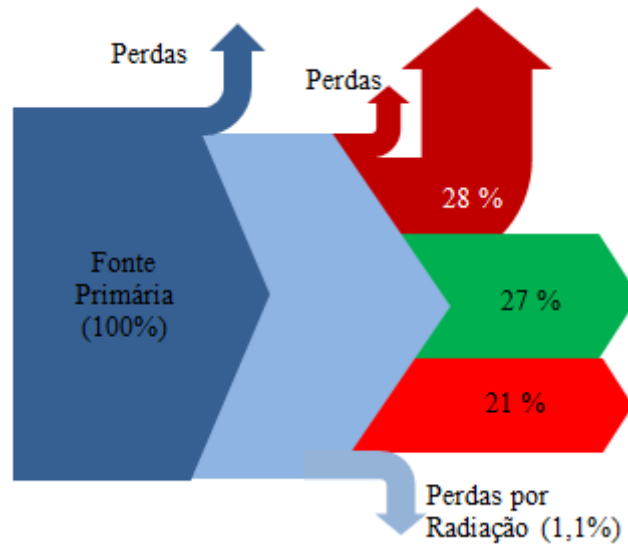


Figura 5.10 - Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 2

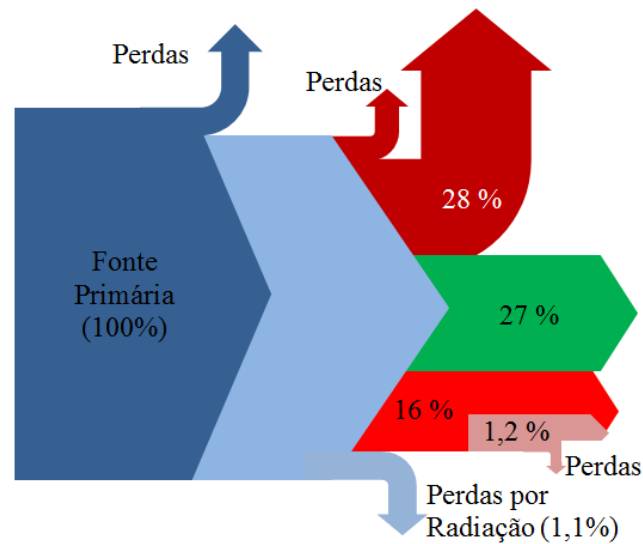


Figura 5.11 - Diagrama de Sankey das energias envolvida no Arranjo 3

Nesse ultimo SAD (arranjo 3), os subsistemas contemplados são o alternador (27%), sistema de arrefecimento (28%), os gases de escape na entrada do gerador de calor (16%) para produzir frio no sistema de refrigeração e a saída desses, reaproveitado para produzir calor para a usina de biodiesel (1,2%).

5.2.4.2 Diagrama de Grassman

Conceitualmente, Zheng e tal (2004), Badami e Mura (2010) definem diagrama de Grassmann como uma ferramenta que representa graficamente as entradas e saídas

dos balanços de exergia. É também designado como diagrama de fluxo de exergia e ilustra as quantidades e direções de fluxos de exergia.

A figura 5.12 representa as perdas exergéticas ao longo do processo de produção de eletricidade e reaproveitamento de energia térmica, iniciada pela fonte primária, que é o gás natural. Nessa figura, não são apresentados os arranjos de modo isolado, apenas a estruturação que é similar, quando considerado o alternador como fonte de energia elétrica e produção de energia térmica na produção de calor e/ou frio.

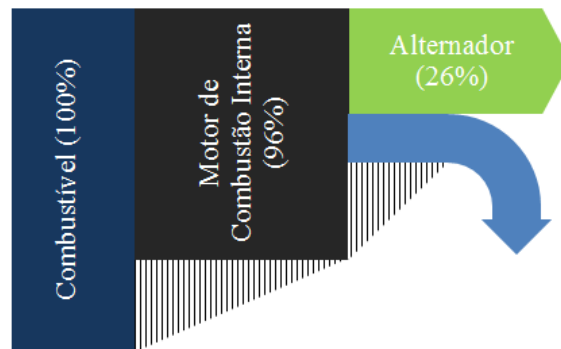


Figura 5.12 - Diagrama de Grassmann das exergias envolvidas na produção de eletricidade, aquecimento e frio

CAPITULO VI

CONCLUSÕES

O desenvolvimento dos arranjos no SAD apresentaram melhorias que por exemplo, podem ser observadas nos valores energéticos. No grupo motor gerador, o alternador produziu energia nominal em torno de 80 KW e forneceu pouco menos de 5KWkg. Isso se deve ao fato da indisponibilidade de cargas na edificação da RECOGÁS.

A usina de biodiesel que necessita do aquecimento do óleo para as reações químicas, atendeu satisfatoriamente. Para o aquecimento desse óleo, utiliza resistências elétricas com potência total de 1,2 KW. O óleo aquecido pelo sistema SAD substituindo as resistências oferece capacidade energética até superior ao valor de 1,2KW. Os motores instalados na usina, alguns desses, encontravam-se em manutenção, o que impossibilitou ensaios com todas as cargas elétricas. Apenas dois motores bombas entraram em operação e que são responsáveis pela circulação do fluido de óleo. É essencial que essas bombas estejam em perfeita funcionalidade, pois permite a utilização no SAD.

Nos gráficos que mostram o perfil da temperatura no reservatório da usina, os valores empíricos obtidos no laboratório de biodiesel são atendidos, pois a temperatura que se melhor comporta é a de 35°C para o processamento da reação do biodiesel.

A energia térmica poderia ser melhor reaproveitada do recuperador de calor pelos gases diretos do MCI ou indiretos (reaproveitados do recuperador de calor) caso a usina de biodiesel fosse instalada próximo.

A geração própria de energia fornecida pelo alternador é de forma ininterrupta, sendo estimado o tempo de operação dessa geração com o combustível disponível. Portanto, torna-se uma vantagem fundamental para a usina de biodiesel, sistema de refrigeração por absorção e demais projetos do IES, garantindo uma operação de processo de produção até sua finalização. Caso a alimentação seja interrompida, a

“batelada” será prejudicada e toda a produção será perdida, não tendo retorno com gastos do material utilizado na “batelada”. Já a alimentação convencional do Campus pode apresentar quedas de alimentação, bem como apagões como já aconteceu em algumas situações.

O uso do gás natural como fonte primária do SAD vem a contribuir em relação a danos ambientais de poluição. A biomassa, por exemplo, é uma fonte energética renovável em motores no Brasil, e está sendo utilizada em substituição aos convencionais, como a gasolina. Além de seguir exemplos do mundo, propiciando notoriedade ao país, incentiva políticas de conservação ambiental. Uma das propostas futuras desse trabalho é substituir o gás natural por biogás.

Através do aparato experimental foi possível fazer análises do SAD, porém esses valores poderiam ser melhorados se o sistema SAD fosse automatizado. O aparelhamento deve ser uma das prioridades futuras para que novas pesquisas apresentem maior gama de informações nas diversas áreas como elétrica, térmica, gerenciamento, produção e custo.

Os ensaios termográficos possibilitou uma análise mais detalhada dos fluídos em torno das tubulações, bem como detectando pontos quentes que não havia isolamento térmica adequada.

Pelo fato da massa não ser consumida por completo, a poluição ambiental existente decorre dessa matéria não ser consumida até sua aniquilação, o que acarreta geração de resíduos que podem ou não, serem incorporados para a sua reutilização. Nessa linha de pensamento, o SAD possibilita idealizar projetos na área exegoambiental, o que trará a redução de resíduos e a melhoria com o uso consciente da energia.

Como sugestões futuras, o desenvolvimento do modelo matemático teórico completo do SAD para ser desenvolvido parte de simulação, permitindo otimizar o sistema na condição real.

O desenvolvimento de um sistema de bypass para trabalhar com os três arranjos sem que necessite a remoção de estruturas para adequar ao arranjo em estudo.

Instalação de um simulador de carga na faixa de até 100 KVA nos três tipos de carga: resistivos para aquecimento e iluminação, indutivo para motores, transformadores, capacitivo para correção de fator de potência e estudos do sag e swell, Laboratório de estudos de manutenção e operação.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition.** Electric power systems research, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001.

A. K. e WILHELM, H. M. **Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil.** *Revista Ciência e Desenvolvimento*, n. 31. jun./dez. 2003. Disponível em: <http://www.toledocorrea.com.br/wp-content/uploads/2011/01/BIODIESEL2.pdf> <acesso em 04 de jul. 2015>.

ALEGRE, A. D. **Revista Climatização + Refrigeração**, São Paulo: Ed. Nova Técnica, Mensal. ISSN 1981-4232, p. 49-54, 2013.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, <http://www.anp.gov.br> <acesso em 02 de jan. de 2014>;

ARTECONI, A.; BRANDONI, C.; POLONARA, F. **Distributed generation and trigeneration: Energy saving opportunities in Italian supermarket sector.** *Applied Thermal Engineering*, v. 29, n. 8, p. 1735-1743, 2009.

AYRES, R. U., PEIRÓ, L. T., e MÉNDEZ, G. V., **Exergy Efficiency in Industry: Where Do We Stand?** American Chemical Society. v. 45, p. 10634-10641, 2011.

BALBINOT, A., BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2011.

_____. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2011.

BALESTIERE, J.A.P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. 1.ed. Florianópolis, Santa Catarina, UFSC, 2002.

BANKOVIĆ I., B.; STAMENKOVIĆ, OLIVERA S.; VELJKOVIĆ, VLADA B. ***Biodiesel production from non-edible plant oils***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, p. 3621– 3647, 2012.

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. CRC Press. Flórida-USA, 2006.

BAUMGARTEN, C. **Mixture Formation in Internal Combustion Engines**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2010.

BEN, **Balanco Energético Nacional** – Ano base 2014: Relatório Síntese, Rio de Janeiro, 2015.

BERECHE R.P, **Avaliação de sistemas de refrigeração por absorção H₂O/LiBr e sua possibilidade de inserção no setor terciário utilizando gás natural**.2007 UNICAMP, Dissertação de Mestrado , Campinas-SP. 2007.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: Para quê? Para quem? Crise Alternativa para um país sustentável**. Livraria da Física, São Paulo, 2002.

BICHO, H.E.F.S.; CATALÃO, J. P. S; MENDES, V. M. F. "**Estudo das tecnologias de cogeração e trigeração para aplicação na indústria de serração de madeira e mobiliário**", Engenharias ' In: Actas da Conferência de Engenharia da UBI, Covilhã, Portugal, 2009.

BISTAFA, S. R., **Acústica aplicada ao controle do ruído**, Blucher, São Paulo, 2006.

BOLSISTA DE VALOR: **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense** v. 2, n. 1, p. 113-119, 2012.

BOLTON, W. **Instrumentação & Controle**, Hermus, Curitiba-PR. 2002.

BOWER, J. L.; CHRISTENSEN, C. M. **Disruptive technologies**: catching the wave. Harvard Business Review Video, 1995.

BRAGA, B. *at all*. **Introdução à Engenharia Ambiental**: O desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. Pearson. São Paulo, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Modelo Energético Brasileiro**. Versão II. Brasília, Maio, 1981.

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. Blucher , v.1, 2012.

_____. Motores de combustão interna. Blucher , v.2, 2012.

CARVALHO, F.R.; NOGUEIRA, L.A.H.; TEIXEIRA, F.N. Cogeração e geração distribuída. In: LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R.(2004). **Geração termelétrica**: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1296 p.

CASTRO, N., J, BRANDÃO, R., DANTAS, G. de A, **Considerações Sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hidríco Brasileiro**, V Seminário Internacional do Setor de Energia Elétrica. p. 117 – 153. Fundação Alexandre de Gusmão, Brasília. 2011.

CEEE-D, **Analísador digital de Qualidade de Energia**, Manual de Normativa. Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D. 2010.

ÇENGEL, Y. A. BOLES, M. A.; **Termodinâmica**. 5. ed., McGraw-Hill Inc. 2006.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical geography**: a systems approach. London: Prentice-Hall, 1971.

CHRISTOFOLETTI, J. C. **Considerações sobre a deriva nas pulverizações agrícolas e seu controle**. São Paulo: Teejet South América, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**, 1.ed., editora BLUCHER, 1999.

CHUA, H. T., TOH, H. K. e NG, K. C., **Thermodynamic modeling of an ammonia-water absorption chiller**, International Journal of Refrigeration, v. 25, p. 896-906, 2002.

CORDEIRO M. C. L., **Estudo Termodinâmico e Avaliação Experimental do Protótipo 01 do Sistema de Refrigeração por Absorção com o Par Água-Brometo de Lítio da Recogás**. 2012. Dissertação de Mestrado. 2012.

CORTEZ, L.A.B., MÜHLE, I.N, SILVA A. da. **Refrigeração por Absorção com o par Água Amônia e Seu Potencial No Caso Brasileiro** , Revista Abrava (Jan-Fev) p.38-33. 1994.

COSTA, Y. J. S. e COSTA, Y. J. R., **Análises de Emissões e Eficiência Energética em um Motor de Combustão Interna do Ciclo Diesel Operando com Biodiesel e Gás Natural**, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho a 3 de agosto, São Luis, MA. ,2012.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. UNICAMP FEEC/DSCE, Julho, 2010. 11p. Apostila <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/qualidade/a1.pdf> , acessado em 30/08/2014).

DELGADO, L. M. **El tractor agrícola y utilización**. Madri: La laboreo Solo tractor, 1991.

DESHPANDE, A., ANITESCU, G., RICE, P. A., TAVLARIDES, L.L. **Supercritical biodiesel production and power cogeneration: Technical and economic feasibilities**. Bioresource Technology n° 101, pp. 1834-1843, 2010.

DINCER, I. CENGEL Y. A. **Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering**. Entropy, v. 3 p. 116- 149, 2001.

DINCER, I.; ROSEN, M. A., **Exergy: energy, environment and sustainable development**. Newnes; 2012.

DORGAN, C. B., DORGAN, E. C., LEIGHT, S. P., **Application Guide for Absorption Cooling / Refrigeration Using Recovered Heat**. Atlanta, USA, America Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1995.

DUGAN, R. C., McGRANAJHAN, M. F., SATOSO, S, BEATY, H, W., **Electrical Power Systems Quality**, 2.ed., Downloaded from Digital Engineering Library @ McGraw-Hill (www.digitalengineeringlibrary.com), 2004.

EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M. M. A. **Distributed generation technologies, definitions and benefits**. Electric power systems research, v. 71, n. 2, p. 119-128, 2004.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. tradução: LASCHUK, A., “**Máquinas Elétricas**”, 6. ed. 2006.

FLORIDES, G. A., KALOGIROU, S. A., TASSOU, S. A. & WROBEL, L. C. **Design and construction of a LiBr–water absorption machine**. Energy Conversion and Management, 44: 2483-2508, 2003.

FLUID MANAGEMENT SYSTEM. **Manual do Medidor de Vazão Ultra-sônico**. UFM170. Manual de Operação. São Paulo,. 62p. 2007.

FOX, R. W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. -6. ed.- Rio de Janeiro, LTC. 2006.

GALLO, W. L. R. **Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool**. (PhD). Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1990.

GOLDEMBERG, J. **Energia e Desenvolvimento Sustentável**. Série Sustentável. v. 4, Blucher, São Paulo, 2010.

GOMES, M. M. da R. **Produção de Biodiesel a Partir da Esterificação dos Ácidos Graxos Residual de Peixe**. Dissertação de Mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro. 2009.

GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. (Ed.). **Electric energy systems: analysis and operation**. CRC Press, 2008. Frank (Ed.). Handbook of energy efficiency and renewable energy. Crc Press, 2007.

GOPISETTY, S.; TREFFINGER, P. **Combined cooling, heat and power (Trigeneration) at Offenburg** University of Applied Sciences. Environmental Biotechnology, v. 9, 2013.

GUZZELLA, L., ONDER, C. H., **Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems**. Springer, Zurique. 2010.

HEROLD, K. E., RADERMACHER, R; KLEIN, A. S. **Absorption Chillers and Heat Pumps**. CRC Press, Printed in the U.S.A. 1996.

INCROPERA, F. P., *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2008.

JALURIA, Y. **Design And Optimization of Thermal Systems**, 2^o ed., CRC Press, United States Of America, 2008.

JENKINS, N.; EKANAYALE, J. B., STRBAC, G.. **Distributed Generation**. Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. 2010
http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP1998_ART379.pdf <acessado em set. de 2014>.

KALOGIROU, S.; FLORIDES, G.; TASSOU, S.; WROBEL, L. **Design and Construction of a Lithium Bromide Water Absorption Refrigerator**. 2002.

KANG, Y. T., KUNUGI, Y; KASHIWAGI, T. **Review of Advanced Absorption Cycles: Performance Improvement and Temperature Lift Enhancement.** International Journal of Refrigeration, v. 23, p. 388-401. 2000.

KANG, Y. T., HONG, H., PARK, K. S. **Performance analysis of advanced hybrid GAX cycles: HGAX.** International Journal of Refrigeration, v. 27, p. 442-448. 2004.

KISTLER P. **Advantages and Disadvantages of Using Absorption Chillers to Lower Utility Bills.** California: Naval Facilities Engineering Service Center, 1997. Disponível em: <https://energy.navy.mil/publications/techdatasheets/tds2041.pdf>, Acesso em: 21 de novembro de 2012.

KNOTHE, G.; GESPEN, J. V.; KRAHL, J.; **Manual de biodiesel**, Edgard Blücher: São Paulo, 2006.

KOCIS, G. R., GROSSMANN, I. E. **Relaxation Strategy for The Structural Optimization Of Process Flowsheets.** Department of Chemical Engineering Carnegie-Mellon University Pittsburgh, PA 152131986.

KOTAS T.J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis.** 1 ed. London, UK Butterwoths. 1985.

LAI, S. M., HUI, C. W., **Integration of trigeneration system and Thermal Storage Under Demand Uncertainties, Applied Energy.** v. 87, p. 2868-2880. 2010.

LEITE, A. D. **Eficiência e Desperdício da Energia no Brasil.** Elsevier. São Paulo, 2013.

LEME, J. A. B., RIBEIRO, S. N., DALBO, F. G., **Autoprodução de Energia : Riscos e Oportunidades.** <http://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2011/06/>

AUTOPRODUÇÃO-DE-ENERGIA-RISCOS-E-OPORTUNIDADES1.pdf <Acesso em 23 de julho de 2015>

LEVENSPIEL, O. **Termodinâmica Amistosa Para Engenheiros**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2011.

LINK, W. **Metrologia Mecânica: Expressão da Incerteza de Medição**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Tecnológicas S.A., 1999.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. **BIODIESEL: Parâmetros de Qualidade e métodos analíticos** Química Nova, 32 (6), p. 1596-1608, 2009.

LORA, E. E. S. e NASCIMENTO, M. A. R. do. **Geração Termelétrica: Planejamento, projeto e operação**. Editora Interciência, v. 1. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Geração Termelétrica: Planejamento, projeto e operação**. Editora Interciência, v. 2. Rio de Janeiro, 2004.

LOZANO, M. A., CARVALHO, M., RAMOS, J. C., SERRA, L. M. **Thermoeconomic Analysis of Simple Trigeneration Systems**. Int. Centre for Applied Thermodynamics. v. 12, p. 147-153. 2009.

LUCARINY, JOSE G. D. **Proteção de Equipamentos Elétricos: Manuais CNI, SESI**, Rio de Janeiro, 1980.

MAMEDE FILHO, J., FILHO, D. R. M., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2013.

MAMEDE FILHO, JOÃO. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro, Editora LTC. 2007.

MARION, J. NSAKALA, N. Y, GRIFFIN, T. and BILL, A. **Controlling Power Plant CO₂ Emissions: A Long Range View**. https://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/1b2.pdf. <acessado em 01 de jun. 2015>.

MARQUES, F. A. S. **Implementação e Validação Prática de Modelos Multidisciplinares Abordados em Uma Central de Cogeração de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. UNESP. 2007.

MARTINHO, E., **Distúrbios da Energia Elétrica: Qualidade de Energia- Conceitos – Cuidados – Soluções - Normalização**, 2. ed., Editora Érica Ltda. São Paulo, 2011.

MARTORELL, M. M. **Desarrollo de um Absorbedor Tubular Vertical Enfriado por Aire para um Climatizador de Absorcion de Agua-Bromuro de Litio**. 2000. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Escola Tecnica Superior D'Enginyeria Química – Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, Espanha.

MEDVED, D. **Trigeneration Units**. 2011. http://home.zcu.cz/~tesarova/IP/Proceedings/Proc_2011/Files/Medved.pdf <acesso em 02/12/2015>;

MELLO JR., A. G. de, **Acionamento de Máquinas de Fluxo por Motores de Combustão Interna a Gás Natural**. Tese de Doutorado. USP, 2006;

MELLO JR., P. R. M.. **O Ruído Industrial e sua Regulamentação Nacional e Internacional**. UFRJ / PROARQ.

MDA, **Manual técnico da Minipa**. <http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/MDA-20-1100-BR.pdf> <acesso em set. 2014>

MILLER, G. Tyler M., **Ciência Ambiental**, Tradução da 11.ed. Norte-Americana. São Paulo, CENGAGE Learning, 2007.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BARLEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7 ed, Grupo Gen-LTC, 2014.

MOREIRA, H. L., 2004, **Análise Termoeconômica de Sistemas de Refrigeração por Absorção com o Par Água-Brometo de Lítio**. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB. 2004.

MOSER BR. **Biodiesel production, properties, and feedstocks**. In Vitro Cell Dev PI2009;45:229–66.

NAGAOKA, M. P. T.; ESPERANCINI, M. S. T., **Viabilidade econômica sob condições de risco em cogeração de energia elétrica**. Energia Agrícola, Nº 2, v. 21, p. 81-98. Botucatu, 2006.

NASCIMENTO, F. N.; OLIVEIRA Neto, O. J.; FIGUEIREDO, R. S. e MAIA, L. C. C., **Metodologia System Dynamics Aplicada ao Estudo da Viabilidade Econômica da Cogeração de Energia pela Utilização do Bagaço da Cana-De-Açúcar**. VI Congresso Virtual Brasileiro de Administração, Convibra 09. 18 a 19 de nov. 2009.

PBGAS, **Companhia Paraibana de Gás**, <http://www.pbgas.com.br/> <acesso em março de 2015>.

PETROBRÁS, <http://www.petrobras.com.br> <acesso em 28 de jan. 2014>

POOLE, A.; HOLLANDA, J.; TOLMASQUIM, M. **Produção independente de eletricidade e eficiência energética**. Revista Brasileira de Energia, v. 4, n. 1, p. 78-92. 1995.

RAMOS, L. P., KUCCK, K. T., DOMINGOS POWER GENERATION. **Engenharia de Aplicações**: Manual de aplicações para grupos geradores arrefecidos à água. Manual nº TO30G_PT, Rev. dez. de 2011).

RIVERO, M. G. POLIDO, R. **Termología Para La Aplicación Del Método De Exergia.**

Revista Del IMEQ ano XXXII. v.17, p7-11. 1990.

ROCHA, M. A., GARRIDO, A. P.. **Revista Climatização + Refrigeração**, São Paulo: Ed.

Nova Técnica Editorial, Março, 2013, Mensal. ISSN 1981-4232, p. 63-66.

ROCHA, M. S., ANDREOS, R., SIMÕES-MOREIRA, J.R., **Performance Tests of Two Small Trigeneration Pilot Plants**, Applied Thermal Engineering XXX (2012) 1-8.

ROSA, R.A. SILVA A.A. **Motores A gás e recuperação de CO₂ a melhor eficiência em cogeração.** 2003. Em <http://www.gasnet.com.br/conteudo/3110> acesso em 17/01/2013.

SANTANA G.C.S. **Análise energética e exergética em sistema de cogeração para uma empresa do setor terciário.** 2003. Dissertação de Mestrado Sc PPGEQ/DEQ/UFBA Salvador BA, Brasil. 2003.

SANTOS, P. S. B., DAUN, L. G., SCARPIN, L. M. e RAMOS, R. A. V., **Análise do Desempenho e do Custo da Produção de Eletricidade de Um Moto-Gerador em Função da Carga e do Combustível Utilizado**, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 31 de julho a 03 de agosto, São Luis, MA-Brasil, 2012.

SANTOS, M. N. N., SILVA, R. D. S., TOSTES, M. E. L. e FADEL, R. S., **Software para Monitoração e Análise de Grandezas da Qualidade da Energia Elétrica**, VIII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2009, Ubatuba, São Paulo.

SANTOS, C. M. S. **Análise Exergoeconômica de uma Unidade de Cogeração a Gás Natural com Refrigeração por Absorção.** 2005. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB. 2005.

SANTOS, C. M. S. TORRES E.A. **Estado da Arte de Refrigeração por Absorção para Aplicações em Sistemas Industriais**, In: anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica João Pessoa – Paraíba (CD-ROM). 2002.

SAVOLA, T. **Simulation and optimisation of power production in biomass-fuelled small-scale CHP plants**. Licentiate.s thesis. Helsinki University of Technology. 2005.

SAVOLA, T. & FOGELHOLM, C. J. 2005. **MINLP optimisation model for increased power production in small-scale CHP plants**. Applied Thermal Engineering. (Submitted.)

SILVA, D. A. **Primary-to-Final Energy and Exergy Flow Portuguese Energy Thesis to obtain the Master of Science Degree in Mechanical Engineering**, Ullisboa, July 2013.

SILVA, A. V. da; COSTA, P. M.P.. **Cogeração e trigerção**. Um caso prático. Neutro à Terra, n. 9, p. 47-54, 2012.

SILVA J. C. **Análise Termodinâmica E De Transferência De Calor Para Dimensionamento De Um Sistema De Refrigeração Por Absorção Para Aplicações Em Baixas Temperaturas Usando Gás Natural**. 2009. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

SIPILÄ, K.; PURSIHEIMO, E.; SAVOLA,T.; FOGELHOLM, C-Johan; KEPPO, Ilkka e AHTILA, Pekka, 2005, **Small Scale Biomass CHP Plant and District Heating**, Espoo 2005. VTT Tiedotteita, Research Notes 2301. 129p.

STAMENKOVIC', OLIVERA S.; VELIC~KOVIC', ANA V.; VELJKOVIC, VLADA B. **The production of biodiesel from vegetable oils by ethanolysis: Current state andperspectives**. Fuel, v. 90, p.3141–3155, 2011.

SZARGUT, J. **Exergy Analysis of Thermal Processes and Systems with Ecological Applications**, *Encyclopedia of Life Support Systems*, <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-03-30.pdf>. <acessado em ago. de 2013>;

SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R. **Exergy Analysis of Thermal, Chemical And Metallurgical Processes** 1 ed. New York USA, Hemisphere Publishing. 1988.

SRIKHIRIN, P.; APHONRATANA, S.; CHUNPAIBULPATANA, S. **A review of absorption refrigeration technologies**. *Int Journal of refrigeration* v 19, n. 7, pp 343-372. 2001.

TAILLON, J.; BLANCHARD, R. E. **Exergy efficiency graphs for thermal power plants**. *Energy*, v. 88, p. 57-66, 2015.

TAVARES, L. **Excelência na Manutenção - Estratégias, Otimização e Gerenciamento**. Salvador: Casa da Qualidade Editora Ltda., 1996.

TEIXEIRA, M. C., TAOUIL, D. S. G. **BIODIESEL: uma energia alternativa e verde**. *Revista VÉRTICES*, v. 12, n. 3. Set/dez. Campos dos Goytacazes – RJ. 2010.

TELLES, P. C. S., **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10º ed. Rio de Janeiro: LTC, 252p. 2007.

TORCHIO, M. F. **Energy-exergy, environmental and economic criteria in combined heat and power (CHP) plants: indexes for the evaluation of the cogeneration potential**. *Energies*, v. 6, n. 5, p. 2686-2708, 2013.

TORREIRA, Raul P., **Instrumentos De Medição Elétrica**, 3 Edição, Editora HERMUS, Curitiba, PR, 2002.

TORRES, E.A., **Avaliação Energética E Termoeconômica De Um Sistema De Co-Geração De Um Pólo Petroquímico**, tese D.Sc., FEM/UNICAMP Campinas – SP, Brasil. 1999.

TSATSARONIS, G, **Thermoeconomic Analysis And Optimization of Energy Systems**, **Progress in Energy and**, v. 19, n.3, pp. 227-257. 1993.

TUCRNS, A. R., KRAIGE, D. R.; **Property Tables for Thermal Fluids Engineering**, Ambridge University Press, New York, 2007. Casa da Qualidade, Salvador-BA, 1996.

VAN Gerpen, J. **Biodiesel processing and production**. Fuel Processing and Technology 86, 1097–1107. 2005.

VAZ, C. E. M.; MARTINS, C. E.; DOS MAIA, S. W. G.. **Tecnologia da indústria de gás natural**. Edgard Blucher, 2008.

VELÁZQUES, N, BEST, R. **Methodology for the energy analysis of an air cooled GAX absorption heat pump operated by natural gas and solar energy**, Applied Thermal Engineering, v. 22, n. 1, pp. 1089-1103. 2002.

WANG, L., SUNDÉN, B., MANGLIK, R. M., **Plate Heat Exchangers: Design, Applications, and Performance**. WIT Press, USA, 2010.

WERKEMA, C. **Avaliação De Sistemas De Medição**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2011. (Série Werkema de Excelência empresarial).

WRIGHT, J. TC; DE CARVALHO, D. E.; SPERS, R. G. **Tecnologias disruptivas de Geração Distribuída e Seus Impactos Futuros sobre Empresas de energia** DOI: 10.5585/rai. v6i1. 284. RAI: revista de administração e inovação, v. 6, n. 1, p. 108-125, 2009.

WYLEN, V.; SONNTAG; BORGNAKKE. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

APÊNDICE A

MEDIÇÃO DAS TEMPERATURAS NO SAD USANDO TERMOPARES

A.1 – VALORES MEDIDOS PARA O ARRANJO 1

Tipologia 1												
Protótipo para sistema de Refrigeração por absorção												
Temp. Protótipo		Amostra (°C)										
Tempo (min)		5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	Valor Medio
Medição da Temperatura Termopar_Nº	T_1	248,00	374,00	99,00	402,00	404,00	402,00	402,00	406,00	410,00		349,67
	T_2	346,00	389,00	390,00	395,00	401,00	308,00	402,00				375,86
	T_3	252,00	272,00	294,00	308,00	320,00	327,00	330,00	340,00	350,00		310,33
	T_4	52,00	62,00	69,00	65,00	79,00	91,00	92,00	82,00	105,00		77,44
	T_5											
	T_6											
	T_7											
	T_8											
	T_9	81,00	65,00	81,00	80,00	92,00	95,00	92,00	86,00	81,00		83,67
	T_10											
Observação 1: A válvula de alívio foi aberta no tempo de 10min, o que deve ter propiciado um valor de temperatura menor.												
Observação 2: Os valores de temperatura no termopar T_2 foram interrompidos devido a desconexão do terminal.												

A.2 – VALORES MEDIDOS PARA O ARRANJO 2

APÊNDICE B – ANÁLISE DOS GASES DE EXAUTÃO PARA MCI A GÁS NATURAL

Quarta feira 15 de julho

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1800	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,38	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,2	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,1	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	391	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	73	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,62	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1646	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,21	
Diluição	:	3,56	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1780	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,41	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,2	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,2	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	370	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	69	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,73	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1558	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,21	
Diluição	:	3,56	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1880	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,41	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,3	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,1	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	357	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	67	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,64	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1449	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,05	
Diluição	:	3,70	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1890	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,40	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,2	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,1	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	329	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	66	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,66	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1364	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,14	
Diluição	:	3,62	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1790	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,36	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,2	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,3	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	370	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	78	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,52	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1561	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,21	
Diluição	:	3,56	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1850	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,41	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,3	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,2	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	366	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	75	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,68	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1501	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,10	
Diluição	:	3,66	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1780	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,41	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,2	% vol
O2 (Oxigênio)	:	15,1	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	388	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	71	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,69	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1604	ppm vol
Fator de Diluição	:	4,13	
Diluição	:	3,63	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

UPPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0.490
RPM (Rotação do Motor)	:	1700	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,46	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,4	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,9	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	390	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	70	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,79	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1520	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,89	
Diluição	:	3,86	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Registro Eletônico Industrial Ltda 11.561115			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1860 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,47 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,6 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,6 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 368 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 67 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,73 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1358 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,69			
Diluição : 4,07 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1880 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,45 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,5 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,7 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 392 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 79 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,71 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1491 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,80			
Diluição : 3,95 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1950 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,50 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,6 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,6 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 406 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 73 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,81 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1487 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,66			
Diluição : 4,09 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1810 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,51 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,6 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,5 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 435 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 69 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,86 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1588 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,65			
Diluição : 4,11 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1800 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,51 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,5 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,6 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 447 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 76 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,92 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1669 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,73			
Diluição : 4,01 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1670 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,48 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,6 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,7 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 391 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 71 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,77 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1441 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,68			
Diluição : 4,08 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1750 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,47 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,5 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,7 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 395 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 72 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,78 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1493 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,78			
Diluição : 3,97 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	6.490
RPM (Rotação do Motor) : 1750 rpm			
Temperatura do Óleo : °C			
CO (Monóxido de Carbono) : 0,50 % vol			
CO2 (Dióxido de Carbono) : 3,6 % vol			
O2 (Oxigênio) : 14,7 % vol			
HC (Hidrocarbonetos) : 415 ppm vol			
NOx (Óxido de Nitrogênio) : 71 ppm vol			
COc (Monóxido de Carbono Corrigido) : 1,84 % vol			
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido) : 1515 ppm vol			
Fator de Diluição : 3,65			
Diluição : 4,11 % vol			
λ Lambda : 2,000			
Relação Ar Combustível A.F.R. : 27,56			
Data : 15/07/15 Negro Eletrônica Industrial Ltda 11.54711C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1700	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,52	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,7	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,6	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	394	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	66	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,85	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1400	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,55	
Diluição	:	4,22	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1830	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,49	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,7	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,7	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	383	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	83	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,76	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1379	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,60	
Diluição	:	4,16	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1810	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,47	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,6	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,8	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	388	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	71	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,73	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1439	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,71	
Diluição	:	4,04	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1830	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,56	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,5	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,8	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	430	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	69	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	2,07	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1589	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,69	
Diluição	:	4,06	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1860	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,50	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,5	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,7	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	402	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	68	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,88	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1507	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,75	
Diluição	:	4,00	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1860	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,54	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,5	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,7	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	449	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	73	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	1,99	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1672	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,72	
Diluição	:	4,03	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

 UPFB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
04429	5.129	5.4	0,480
RPM (Rotação do Motor)	:	1820	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,57	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	3,5	% vol
O2 (Oxigênio)	:	14,6	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	456	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	71	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	2,09	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1683	ppm vol
Fator de Diluição	:	3,69	
Diluição	:	4,07	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 15/07/15 Nepom Eletrônica Industrial Ltda 11.54111C			

APÊNDICE C

PROCEDIMENTOS DE EOPERAÇÃO DOS QUADROS DO SAD

Nos ensaios realizados inicialmente, foram feitas observações sobre as características de carga a que se objetiva o projeto. Constatou-se que o quadro de comando foi ligado na chave central de comando para trabalhar no modo de operação MANUAL. Ou seja, quando o ensaio fosse realizado sem sinal de rede, o sistema não partia. Essa informações podem ser melhor observadas quando analisa o diagrama de comando do quadro de comando e controle (ver anexo C).

Ao colocar o quadro de comando no modo de operação MANUAL (inicialmente a chave deve estar na posição OFF), o sinal TRANSFERE CARGA só é ativado quando fica sem carga, ou seja, a rede fica anormal e o sinal TENSÃO REDE é ativado.

A ligação elétrica convencional da UFPB não era isolada e interligava quatro edificações do IES. Portanto, foi necessário utilizar uma chave independente para isolar a alimentação e não oferecer riscos às demais cargas (outras edificações).

Como fator principal desse Quadro Geral de Força (QGF) projetado, o intuito é isolar todo o sistema da rede convencional que alimenta os prédios com as cargas interligadas ao SAD, evitando assim, possíveis danos a essas cargas, bem como as outras cargas referentes as demais edificações..

Mesmo com o devido cuidado tomado nos quadros das cargas alimentado pelo grupo gerador, o QGF permite uma proteção maior a todo o sistema.

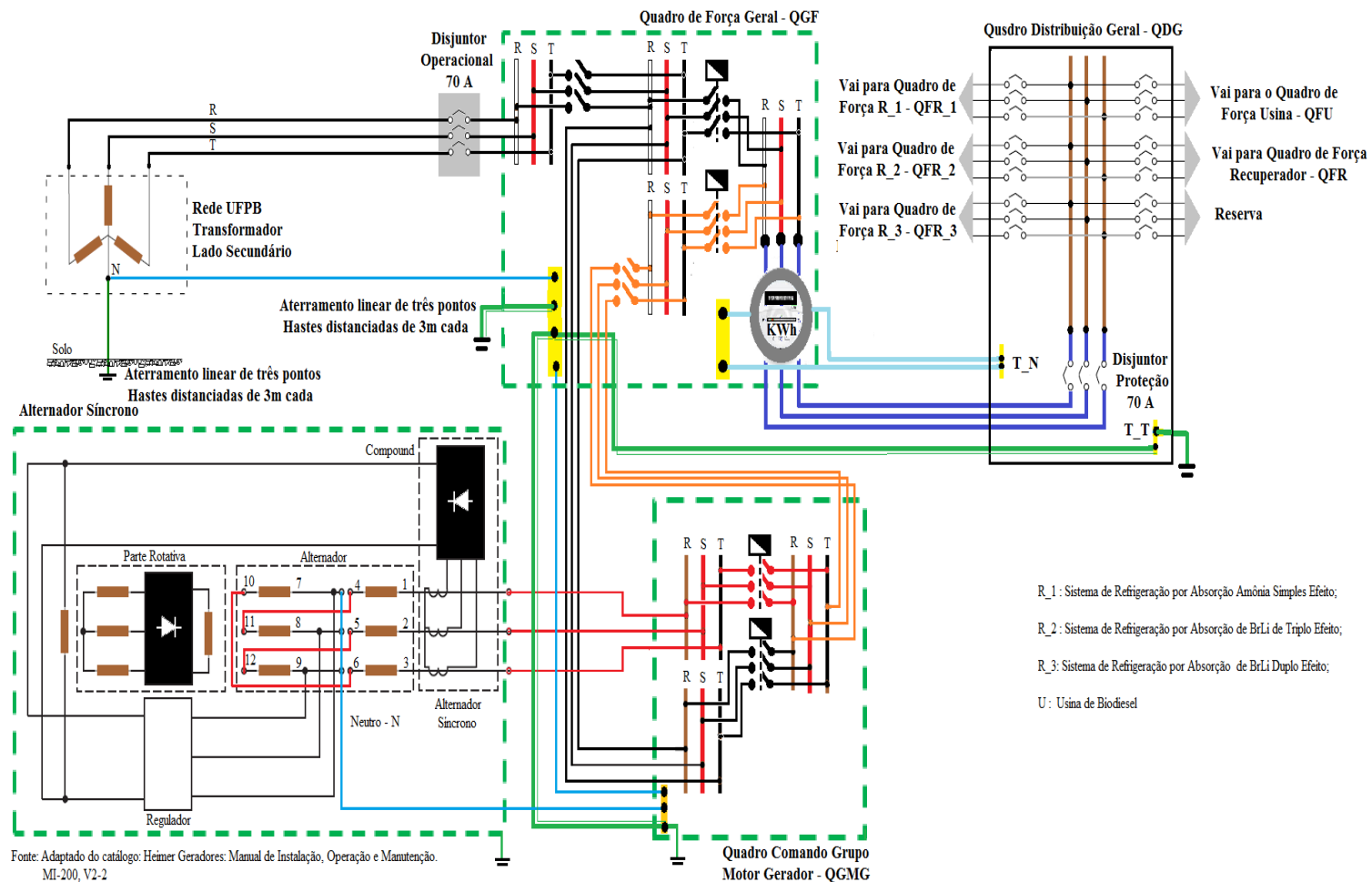
As quatro botoeiras existentes no QGF devem ser acionadas conforme interesse do operador. Para acionar as cargas elétricas sem a utilização do QGMG (mesmo em operação o GMG) o operador aciona a botoeira “Só Rede” e o SAD trabalha apenas com sistema elétrico. Caso contrário, acionando a botoeira “Sem Rede”, a energia elétrica estará desabilitada.

A botoeira “Só GMG” do QGF permite apenas a operação com o QGMG, isolando o barramento energizado que vem direto do transformador sem passar pelo QGMG.

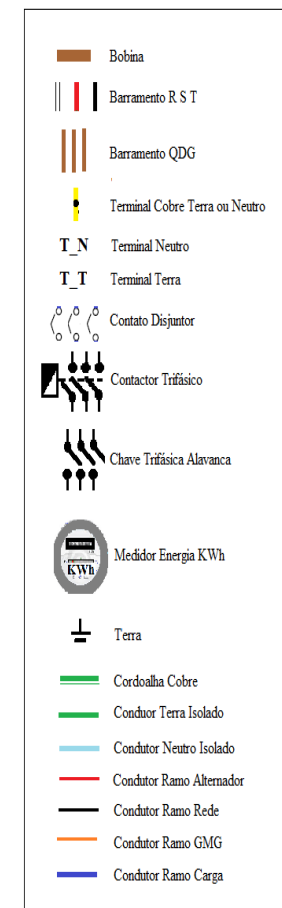
Considerando que o usuário ao ligar o GMG opte pela alimentação vinda do QGF, ele acionará a botoeira “carga da rede” tornando o gerador inoperante, sendo aproveitados apenas os gases de escapamento e arrefecimento do MCI para o sistema térmico sem o uso da energia elétrica do alternador. O operador poderá trabalhar com a carga da rede elétrica convencional do campus.

Acionando a botoeira “carga do gerador”, o GMG estará em funcionamento, fornecendo energia elétrica e térmica para o SAD. O sistema ao estar nessa, a botoeira do “Só GMG” deverá estar acionado no QGF.

APÊNDICE D – DIAGRAMA UNIFILAR DOS QUADROS



SIMBOLOGIA



APÊNDICE E

MEDIDAS DOS TERMOPARES PENTAFIVE

Temperatur Arrefecimento												
Medições para os três tipos de medições com o FiveTemp												
Temp_Protótipo		Amostra (°C)										Valor
Tempo (min)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	Médio
Medição da Temperatura Termopar N ^o	T_1	41,1	46,8	48,7	50,2	49,2	48,8	50		47,2	49,6	48,4
	T_2	43,2	46,7	48,1	48,7	49	49,6	49,9	49,2	49,5	49,6	48,35
	T_3	36,7	40,8	43,2	42,5	42,8	43,4	43,6	48,9	43	43	42,79
	T_4	36,3	38,3	39,7	40,6	40,5	41,1	41,3	42,7	41,4	41,4	40,33
	T_5	44,4	50	52,5	51,5	52,5	53,3	53,3	52,9	53,1	53	51,65
Tempo		5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	
Escape			68			59				77		
Temp_Protótipo		Amostra (°C)										Valor
Tempo (min)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	Médio
Medição da Temperatura Termopar N ^o	T_1	45,2	50,2	49,6	50,5	50,9	52,4	52,9	53,3			50,625
	T_2	45,9	48,4	49,3	50,5	51,2	50,7	51,9	51,6			49,938
	T_3	38,5	41,3	42,8	44	44,5	44,2	44,3	45,3			43,113
	T_4	37,8	40,1	40,8	42,4	42,9	42,8	43	43,3			41,638
	T_5	47,4	50,8	52,8	53,9	54,5	54,5	54,5	55			52,925
Tempo		5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	
Escape		48,2	53,2	53,9	55,4	53,3	50,4	49,9	53,5			
T óleo			34,7	35,5		67,1	68,1	71,8	69,7			

APÊNDICE F

MEDIDAS POR TERMÔMETRO INFRAVERMELHO PARA IRRADIAÇÃO NOS ARRANJOS 2 E 3.

Medida da Dissipação de Calor no Grupo Motor Gerador realizada com pistola térmica													
Temp_Protótipo			Amostra (°C)									Valor	
Tempo (min)			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	Médio
Medição da Temperatura	T_Motor	Área_1		281		192		304		302		315	278,80
		Área_2		52,9		43,6		47,7		49,6		46,9	48,14
	T_Aref	Área_1		34,2		34,4		34,5		40,5		32,2	35,16
		Área_2		39,2		40,4		40,6		40,6		39,6	40,08
		Área_3		34,2		34,4		34,5		40,5		32,2	35,16
		Área_4		39,2		40,4		40,6		40,6		39,6	40,08
	T_Trocador	Área_1		40,4		58,8		45,9		47,2		57,6	49,98
		Área_2		38,5		62,2		53,4		48,2		34,8	47,42
		Área_3		36		38		38		78,8		38,7	45,90
		Área_4		31,5		32,4		52,2		37,8		34,4	37,66
	Obs.: os valores foram divididos em três sub áreas que irão permitir fazer as medidas.												
Temp_Protótipo			Amostra (°C)									Valor	
Tempo (min)			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	Médio
Medição da Temperatura	T_Motor	Área_1	27,3	282,7	321,5	305,8	297,8	302,4	308,8	306,9	321,4		274,96
		Área_2	27,1	69,6	43,9	55,8	41,8	42	44,4	47,9	46,5		46,56
	T_Aref	Área_1	30,2	35,2	36,3	36,7	35,4	36,4	37,7	35,18	37,1		35,58
		Área_2	31,3	39,6	42,7	43	41,6	42,7	50,3	45,9	43,1		42,24
		Área_3	30,2	35,2	36,3	36,7	35,4	36,4	37,7	35,18	37,1		35,58
		Área_4	31,3	39,6	42,7	43	41,6	42,7	50,3	45,9	43,1		42,24
	T_Trocador	Área_1	31,5	34,7	37,7	41,7	35,1		39,9	41,9	43,7		38,28
		Área_2	30,8	48	42,6	83,7	83,9	88,6	90,6	88,1	94,4		72,30
		Área_3	30,6	35,2	45,5	36,4	40,2		38,6	39,6	40,1		38,28
		Área_4	34,3	34,8	36,6	36,4	33	34	35,9	37,8	55,1		37,54
	Obs.: Esse ensaio faz referencia a tipologia 2 realizada no dia 19/07 as 9:45 tendo inicio												
O sistema de exaotor não gasta energia e ajuda a diminuir o desconforto térmico do ambiente,													
isso porque gira sem alimentação, apenas pela influencia do vento, valor pode													
ser considerado insignificante, porém eficiente por ter autonomia no seu gasto.													

ANEXO A

LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E COGERAÇÃO

Pelo Decreto nº 5.163 (BRASIL, 2004), considera-se Geração Distribuída “*a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador*”.

Os empreendimentos de geração hidrelétrica com capacidade instalada superior a 30 MW, ou termelétrica (inclusive de cogeração) com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento (65%), não são considerados GD pelo referido Decreto.

Entretanto, os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética de 65%, para classificação como GD.

Como se pode observar, de acordo com a legislação em vigor, os empreendimentos de geração conectados diretamente às cargas dos consumidores sem interconexão para entrega da potencia gerada ao sistema elétrico do distribuidor não são caracterizados legalmente como GD.

Segundo este mesmo Decreto, a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de GD deve ser precedida de chamada pública promovida diretamente pelo agente de distribuição, de forma a garantir publicidade, transparência e igualdade de acesso aos interessados (BRASIL, 2004).

O Decreto nº 5.163 restringe o montante total da energia elétrica contratada, proveniente de empreendimentos de GD, em dez por cento (10%) da carga do agente de distribuição.

Para os empreendimentos de cogeração, existe um sistema regulatório que ampara as três fases que caracterizam o setor elétrico: a produção, o transporte e o consumo de energia elétrica.

Nestes termos, para a finalidade de comercialização pelo PIE e de permuta por AE, os aspectos legais devem ser considerados prioritariamente, visto que a não adequação dos empreendimentos às normas legais pode até inviabilizar a operação da planta de cogeração, ou provocar condições antieconômicas, independentemente da viabilidade técnica (BRASIL, 2004).

Especificamente aos casos de cogeração, é permitida ao PIE a comercialização para consumidores de energia elétrica integrantes de complexo industrial ou comercial aos quais forneça Vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração, mesmo que esses consumidores sejam “cativos”.

Entende-se por Consumidor Cativo aquele que não possui os pré-requisitos do consumidor livre, podendo ser suprido somente por concessionário ou permissionário de distribuição mediante tarifa regulada.

Ainda é permitida a venda de energia elétrica para “consumidores livres” e para concessionário ou permissionário de distribuição.

Entende-se por Consumidor Livre aquele que pode exercer a opção de compra de energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre – ACL, de qualquer concessionário, permissionário ou autorizado de energia elétrica do sistema interligado, conforme as condições previstas na Lei nº. 9.074, de 7 de julho de 1995 e no Decreto nº. 5.163, de 30 de julho de 2004 (BRASIL, 2004).

Para possibilitar o consumo em instalações industriais do produtor em local diverso daquele onde ocorre a geração, é possível a realização da Permuta de energia, em blocos economicamente equivalentes, com os permissionários ou concessionários de serviço público envolvidos, mediante pagamento do transporte da referida energia.

A venda ou consumo remoto do excedente da energia elétrica gerada por uma central cogeradora depende da sua conexão aos sistemas de transmissão ou distribuição, obedecendo às normas estabelecidas pela ANEEL.

Os usuários desses sistemas ficam obrigados a celebrar os contratos de conexão e de uso das redes de transmissão ou de distribuição; além de efetuar os estudos, projetos e a execução das instalações de uso exclusivo e de conexão com o sistema elétrico da

concessionária ou permissionária, onde será feito o acesso, observando-se o disposto nos Procedimentos de Rede e nos Procedimentos de Distribuição.

Deve-se salientar que os custos das instalações necessárias à conexão da central geradora aos sistemas de transmissão ou de distribuição são de competência do interessado, neste caso o produtor independente ou o autoprodutor, conforme cada caso.

A opção da União pela terceirização de geração de energia é realizada mediante outorga de autorização, de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (Lei nº. 8.987/95, regulamentada pelo art. 63 do Decreto nº. 5.163/04); com competência delegada à ANEEL.

Neste sentido, a ANEEL estabeleceu os requisitos necessários à obtenção de Registro ou Autorização para a implantação ou ampliação de centrais geradoras termelétricas (incluindo cogeração), bem como para a venda da energia elétrica produzida.

Esta Autorização não é dada ao empreendimento central cogeneradora, mas sim à “pessoa”, para que possa implantar, operar e comercializar a energia elétrica proveniente de um empreendimento específico.

Segundo a nova Resolução ANEEL nº. 390, de 15 de dezembro de 2009, a Autorização é outorgada a: pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada à comercialização sob forma de produção independente; e pessoa física, pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo (ANEEL, 2009).

Como foi visto anteriormente, o porte do empreendimento dita a necessidade da outorga: para centrais com potência elétrica de até 5 MW, é necessário apenas que se faça o registro do empreendimento na ANEEL, apresentando as características básicas do empreendimento e a identificação de seu proprietário.

Para o caso de centrais com potência superior a 5 MW, é necessária uma autorização da União, a título não oneroso, válida por 30 anos, para a qual fica obrigada a comprovação tanto da idoneidade do proprietário quanto das condições operativas da central e de sua conexão à rede.

Esta comprovação é justificada pela necessidade de que o empreendimento satisfaça a condição constitucional do “serviço adequado”, requisito necessário à prestação de serviços essenciais à sociedade (neste caso a energia elétrica), definidos pela Lei nº. 9.648 de 27 de maio de 1998 (BRASIL, 1998).

Assim, os empreendimentos de geração termelétrica em geral, incluindo-se aí a cogeração, devem comprovar as seguintes condições, conforme cita BARJA (2006):

Disponibilidade do combustível:

No caso de resíduos de processo ou biomassa, deverá ser comprovada a disponibilidade de acordo com estudos realizados pelo interessado, considerando o processo industrial associado ou o fornecimento a terceiros.

Para o caso de combustíveis comerciais (óleo combustível, óleo diesel, gás natural, etc.) a comprovação de disponibilidade deve ser demonstrada através de contratos de fornecimento ou de declarações de disponibilidade do fornecedor.

Disponibilidade da tecnologia empregada:

A adequação da tecnologia utilizada deve ser demonstrada, para a satisfação dos princípios constitucionais da regularidade, continuidade, eficiência, segurança e atualidade.

Desta forma, são necessários desenhos técnicos de arranjo geral da central, diagramas unifilares, fluxogramas de processo, balanços de energia e de uso de águas, ao nível de potência de geração bruta, o autoconsumo nos serviços auxiliares e no processo industrial, e o intercâmbio externo (importação ou exportação).

Viabilidade de conexão:

A partir da consulta junto à concessionária de distribuição ou de transmissão, ou ainda, junto ao ONS, deve ser elaborado pelo interessado o estudo de viabilidade para a conexão do sistema termelétrico, conforme o ponto de conexão desejado (ANEEL, 2009).

Além disso, a conexão da central deverá constar no memorial descritivo do empreendimento, incluindo a respectiva subestação e as demais instalações de conexão dentro do contexto do sistema ao qual será conectada.

Ao contrário do registro, a autorização para implantação e operação de empreendimentos termelétricos gera a obrigação do pagamento de uma “taxa de fiscalização”, destinada à manutenção dos serviços prestados ao setor pela ANEEL.

Esta taxa é cobrada proporcionalmente à modalidade e ao porte do empreendimento, sendo equivalente ao valor do benefício econômico anual auferido pelo autorizado.

A legislação brasileira que trata da geração distribuída e da cogeração ainda passa por algumas alterações, decorrentes dos ajustes necessários no desenvolvimento e estabelecimento dos mercados e dos produtores, um processo natural e que ocorre sempre que uma estrutura fortemente estabelecida, como o Setor Elétrico, passa por mudanças.

ANEXO B

B.1 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA – ÁGUA SATURADA:
TABELA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Temp. °C <i>T</i>	Pressão kPa <i>p</i>	Volume específico m³/kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap. sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap. sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap. sat.	Vapor sat.
		<i>v_l</i>	<i>v_v</i>	<i>u_l</i>	<i>u_{lv}</i>	<i>u_v</i>	<i>h_l</i>	<i>h_{lv}</i>	<i>h_v</i>	<i>s_l</i>	<i>s_{lv}</i>	<i>s_v</i>
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,3	2382,2	20,98	2489,6	2510,5	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,2	2389,2	41,99	2477,7	2519,7	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,7051	0,001001	77,925	62,98	2333,1	2396,0	62,98	2465,9	2528,9	0,2245	9,5569	8,7813
20	2,3385	0,001002	57,790	83,94	2319,0	2402,9	83,94	2454,1	2538,1	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,1691	0,001003	43,359	104,86	2304,9	2409,8	104,87	2442,3	2547,2	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,2461	0,001004	32,893	125,77	2290,8	2416,6	125,77	2430,5	2556,2	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,6280	0,001006	25,216	146,65	2276,7	2423,4	146,66	2418,6	2565,3	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,3837	0,001008	19,523	167,53	2262,6	2430,1	167,54	2406,7	2574,3	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,5934	0,001010	15,258	188,41	2248,4	2436,8	188,42	2394,8	2583,2	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,032	209,30	2234,2	2443,5	209,31	2382,7	2592,1	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,568	230,19	2219,9	2450,1	230,20	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,671	251,09	2205,5	2456,6	251,11	2358,5	2609,6	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,033	0,001020	6,197	272,00	2191,1	2463,1	272,03	2346,2	2618,2	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,188	0,001023	5,042	292,93	2176,6	2469,5	292,96	2333,8	2626,8	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,578	0,001026	4,131	313,87	2162,0	2475,9	313,91	2321,4	2635,3	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,390	0,001029	3,407	334,84	2147,4	2482,2	334,88	2308,8	2643,7	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,834	0,001032	2,828	355,82	2132,6	2488,4	355,88	2296,0	2651,9	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,139	0,001036	2,361	376,82	2117,7	2494,5	376,90	2283,2	2660,1	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,554	0,001040	1,982	397,86	2102,7	2500,6	397,94	2270,2	2668,1	1,2500	6,1659	7,4158
MPa												
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,91	2087,6	2506,5	419,02	2257,0	2676,0	1,3068	6,0480	7,3548
105	0,12082	0,001047	1,4194	440,00	2072,3	2512,3	440,13	2243,7	2683,8	1,3629	5,9328	7,2958
110	0,14328	0,001052	1,2102	461,12	2057,0	2518,1	461,27	2230,2	2691,5	1,4184	5,8202	7,2386
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,28	2041,4	2523,7	482,46	2216,5	2699,0	1,4733	5,7100	7,1832
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,48	2025,8	2529,2	503,69	2202,6	2706,3	1,5275	5,6020	7,1295
125	0,2321	0,001065	0,77059	524,72	2009,9	2534,6	524,96	2188,5	2713,5	1,5812	5,4962	7,0774
130	0,2701	0,001070	0,66850	546,00	1993,9	2539,9	546,29	2174,2	2720,5	1,6343	5,3925	7,0269
135	0,3130	0,001075	0,58217	567,34	1977,7	2545,0	567,67	2159,6	2727,3	1,6869	5,2907	6,9777
140	0,3613	0,001080	0,50885	588,72	1961,3	2550,0	589,11	2144,8	2733,9	1,7390	5,1908	6,9298
145	0,4154	0,001085	0,44632	610,16	1944,7	2554,9	610,61	2129,6	2740,3	1,7906	5,0926	6,8832
150	0,4759	0,001090	0,39278	631,66	1927,9	2559,5	632,18	2114,3	2746,4	1,8417	4,9960	6,8378
155	0,5431	0,001096	0,34676	653,23	1910,8	2564,0	653,82	2098,6	2752,4	1,8924	4,9010	6,7934

Fonte: WYLEN, BORGNACKE, SONNTAG, 2003

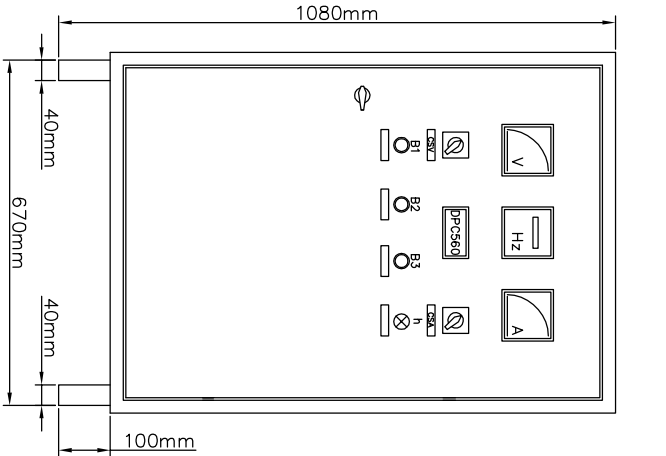
B.2 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA – ÁGUA SATURADA:
TABELA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

<i>T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)</i>											
<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> [°]	when $\Delta s = 0^1$		<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> [°]	when $\Delta s = 0$	
				<i>p_r</i>	<i>v_r</i>					<i>p_r</i>	<i>v_r</i>
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.84	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.23	2.58810	30.38	67.07
420	421.26	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53
430	431.43	307.99	2.06533	4.915	251.1	730	745.62	536.07	2.61803	33.72	62.13
440	441.61	315.30	2.08870	5.332	236.8	740	756.44	544.02	2.63280	35.50	59.82

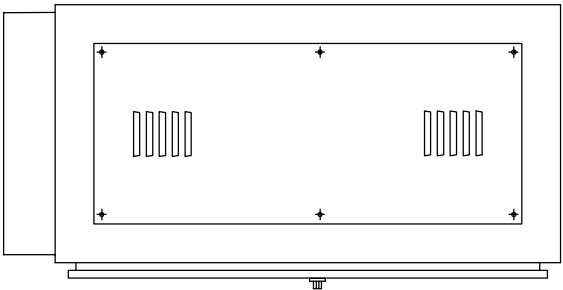
Fonte: MORAN, *at al*, 2014)

ANEXO C

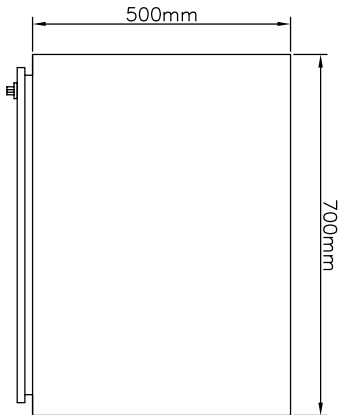
QUADRO DE CONTROLE DO DPC-560



VISTA FRONTAL



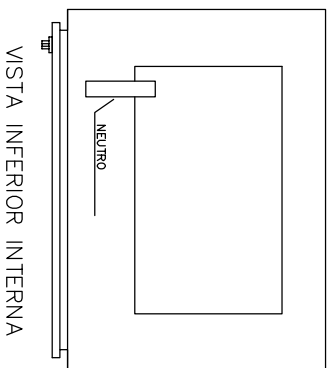
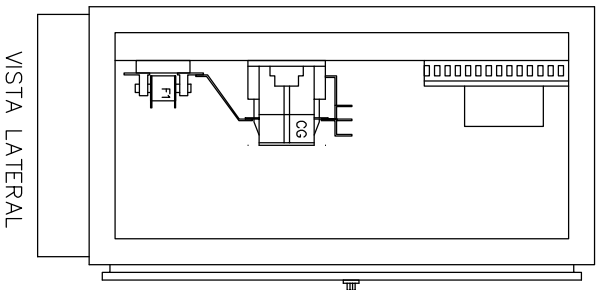
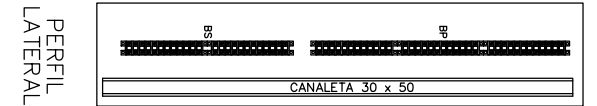
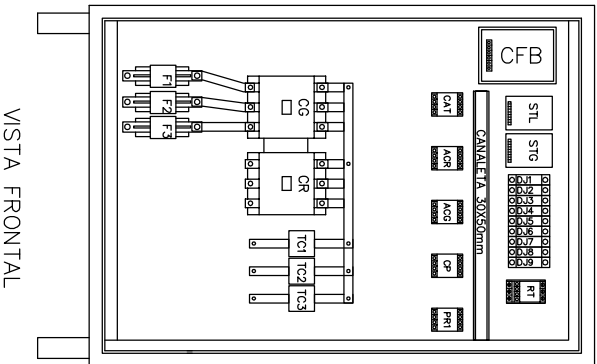
VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	FABRICANTE
V	VOLTIMETRO FM – 96X96mm	ABB
H _z	FREQUENCIEMETRO DE LÂMINAS – 96X96mm	ABB
A	AMPERIMETRO FM – 96X96mm	ABB
CSV	CHAVE SELETORA DE TENSÃO	KRAUS & NAIMER
CSA	CHAVE SELETORA DE CORRENTE	KRAUS & NAIMER
DP-C560	MÓDULO DE CONTROLE DO GNG	DIAMOND
B1	BOTOEIRA LIGA CARGA A REDE	COMANDER
B2	BOTOEIRA DESLIGA CARGA	COMANDER
B3	BOTOEIRA LIGA CARGA AO GNG	COMANDER
h	SINALEIRA DE CARGA DA BATERIA	COMANDER
--	--	--
--	--	--

POTÊNCIA:		NOME		DATA		VISTO	CLIENTE:	OP.: PADRÃO	
TENSÃO:		PROJ. Alcides		Mar/05					
		DES. Gabriel		Mar/05					
		APROV. Alexandre		Mar/05		ESCALA:			
RESPONSÁVEL TÉCNICO:		TÍTULO:							
ALCIDES CARLOS R. DA SILVA		LEON HEIMER S/A							
REG. CREA Nº 0346/83		LAYOUT EXTERNO DO QUADRO							
REV.	DATA	1		5					
		Nº-HEIMER:							
		Arq-HEIMER:							
		Padrão-OP-C560\Ajud.							



SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	FABRICANTE
CFB	CARREGADOR FLUTUADOR DE BATERIA-220Vca/12Vcc/3A	DIAMOND
STL/STG	SENSOR DE TENSÃO REDE/GERADOR	DIAMOND
DJI α DJ9	DISJUNTOR UNIPOLAR 10A	ABB
CP/PRI	CONJUNTOR AUXILIAR	TELEMECANIQUE
CAT/ACR/ACG	CONJUNTOR AUXILIAR	TELEMECANIQUE
RT	RELE TÉRMICO DE SOBRECARGA	WEG
CG/CR	CONTATORES DE FORÇA – 220Vca	SIEMENS
F1 α F3	FUSÍVEIS DE PROTEÇÃO DO GNG	SIEMENS
TC1 α TC3	TRANSFORMADOR DE CORRENTE	SIEMENS
BP	BORNES DE INTERLIGAÇÃO COM A PORTA	BENDAL
BS	BORNES DE INTERLIGAÇÃO COM O GNG	BENDAL
--	--	--

VISTA FRONTAL

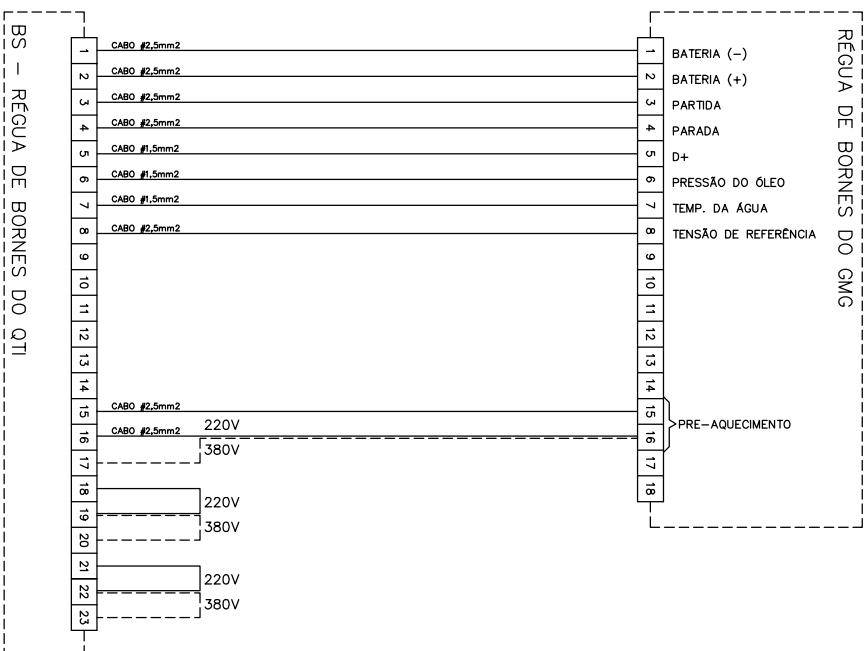
PERFIL LATERAL

VISTA LATERAL

VISTA INFERIOR INTERNA

POTÊNCIA:		TENSÃO:		RESPONSÁVEL TÉCNICO:		ALDORES CARLOS R. DA SILVA REG. CREA Nº 0346/83	
REV.	DATA	PROJ.	DES.	APROV.	NOME	DATA	CLIENTE:
					Aldides	Mar/05	LEON HEIMER S/A
					Gabriel	Mar/05	
					Alexandre	Mar/05	
		ESCALA:		TÍTULO:		LAYOUT INTERNO DO QUADRO	
		2 / 5					
		Nº-HEIMER:					
		Arq-HEIMER:					
		Padrão-OPC560\Atual.					

77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



OBS.: TRACEJADOS PARA LIGAÇÃO EM 380V, CHEIOS PARA LIGAÇÃO EM 220V.

		POTENCIA:		NOME	DATA	MUNDO	CIENTE:	OP.: PADRÃO
		TENSAO:		PROJ.	Aldides	Mar /05	LEON HEIMER S/A	
				DES.	Gabriel	Mar /05		
				APROV.	Alexandre	Mar /05		
		RESPONSÁVEL TÉCNICO:				ESCALA:	TÍTULO:	Nº-HEIMER:
		ALDIDES CARLOS R. DA SILVA		HEIMER GRUPOS GERADORES			DIAGRAMA DE INTERLIGAÇÃO GMG-QTT	Arg-HEIMER:
		REG. CRELA Nº 0346/83	5 / 5					

ANEXO D

D.1 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO MINERAL

Óleo isolante naftênico contendo inibidor de oxidação, para aplicação em transformadores de todas as classes de tensão.

INDUSTRIAL AV-58-IN possui baixo fator de potência, caracterizando pequena dissipação de energia. Recomendado como fluido isolante para transformadores, disjuntores e equipamentos de manobra operando sob qualquer classe de tensão.

O óleo LUBRAX INDUSTRIAL AV-58-IN é classificado como óleo mineral isolante tipo A, conforme as especificações do Regulamento Técnico DNC No 03/94, Portaria DNCo 46, de 02 de Dezembro de 1994. Também é um óleo aditivado com 0,3% de DBPC a fim de aumentar a resistência à oxidação do produto.

As Análises Típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações. Para informações mais detalhadas primeiramente consulte nossa assistência técnica

D.2 – Valores Constante de alguns parâmetros do óleo

ANÁLISES TÍPICAS *		
Densidade a 20/40°C		0,8895
Ponto de Fulgor (VA)	(°C)	140
Ponto de Fluidez	(°C)	-39
Viscosidade a 40°C	(cSt)	9,21
Viscosidade a 100°C	(cSt)	2,42
Fator de Dissipação a 90°C	(%)	0,40
Rigidez Dielétrica, Disco, 2,5 mm	(kV)	30 **
Água	(ppm)	≤ 35 **
Tensão Interfacial, 25°C	(din/cm)	42,8
Ponto de Anilina	(°C)	65
Índice de Acidez Total	(mgKOH/g)	< 0,01
Cloretos e Sulfatos		ausentes
Enxofre Corrosivo		não corrosivo
Estabilidade à Oxidação, 164h, O ₂ /Cu, 100°C		
Borra	(%peso)	0,026
Índice de Acidez Total	(mgKOH/g)	0,102
Fator de Dissipação a 90°C	(%)	0,20