

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Diagnóstico das Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados do Ponto de  
Vista de Adequação aos Limites de Consumo Específico de Combustível,  
Estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e  
Proposição de Alternativas para Redução dos Mesmos.**

**Humberto Wilke**

Itajubá, Dezembro de 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Humberto Wilke**

**Diagnóstico das Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados do Ponto de  
Vista de Adequação aos Limites de Consumo Específico de Combustível,  
Estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e  
Proposição de Alternativas para Redução dos Mesmos.**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Energia como  
parte dos requisitos para obtenção do Título  
De Mestre em Ciências em Engenharia de  
Energia.**

**Área de Concentração: Exploração do Uso Racional  
de Recursos Naturais e Energia**

**Orientadores: Electo Eduardo Silva Lora, Ph.D.  
Osvaldo José Venturini Dr.**

**Dezembro de 2015  
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Humberto Wilke**

**Diagnóstico das Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados do Ponto de  
Vista de Adequação aos Limites de Consumo Específico de Combustível,  
Estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e  
Proposição de Alternativas para Redução dos Mesmos.**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de  
dezembro de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em  
Ciências em Engenharia de Energia.**

**Banca Examinadora.**

---

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora - Unifei  
Orientador

---

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini - Unifei

---

Prof. Dr. Arnaldo Martins Martinez Reyes - PNPD/UNIFEI

---

Prof. Dr. Edgardo Olivares Gomez - Unicamp

Itajubá  
2015

## **Dedicatória**

Aos amigos e orientadores Electo Eduardo Silva Lora e Osvaldo José Venturini dedico este trabalho e agradeço pela paciência, dedicação e ensinamentos ao longo de todo o tempo em que trabalhamos juntos.

A minha mãe Regina Brito Wilke e ao meu tio Humberto Brito Wilke, dedico este trabalho e agradeço o amor e apoio que me deram durante este período de desenvolvimento desta dissertação, bem como toda minha vida.

A minha esposa Daniela de Vasconcellos Prata Veloso, carinhosamente “Dani”, agradeço por estar sempre ao meu lado e me ajudar a ser uma pessoa melhor tanto para mim quanto para os outros. Sem você Dani, esta caminhada não teria acontecido.

## **Agradecimentos**

Aos amigos, Teófilo Rodrigues, Ricardo de Oliveira, Alexandre Freire Magalhaes e Nelson Russo, agradeço pela paciência e ajuda durante todo o desenvolvimento sempre me escutando e trocando experiências sobre o tema da dissertação.

Agradeço, também, a todos que de alguma forma, contribuíram na elaboração deste trabalho.

Agradeço também às “meninas” da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da Universidade Federal de Itajubá, que sempre me atenderam com carinho e atenção sendo um exemplo de como o servidor público deve tratar as pessoas que, de alguma forma, necessitam de ajuda e informações.

## Resumo

A região Norte ou, mais precisamente, grandes áreas pertencentes à Amazônia Legal, permaneceram, ao longo dos anos, por questões de obstáculos naturais e barreiras logísticas, associadas às grandes extensões geográficas, dependentes de subsídios aos combustíveis fósseis (diesel, óleo combustível e gás natural) para que a geração termelétrica descentralizada pudesse atender os consumidores daquelas regiões. No entanto, como forma de reduzir o consumo de óleo diesel nas usinas dos Sistemas Isolados, nos últimos anos e, principalmente, a partir de 2014, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vem restringindo os limites de consumo específico de combustível definidos para as usinas. Esta medida obriga as usinas a adotarem unidades geradoras mais eficientes, ou seja, com baixo consumo de combustível, e procedimentos de operação e manutenção para que o consumo mensal de combustível das usinas esteja abaixo do limite máximo permitido.

Diante deste contexto, a presente dissertação realiza um diagnóstico das usinas termelétricas a diesel dos Sistemas Isolados, identificando suas características, a potência das unidades geradoras, comparando o consumo específico das usinas e suas unidades geradoras, de acordo com os dados dos fabricantes, com o consumo específico definido na legislação vigente regulamentada pela ANEEL. Em seguida, é realizado um estudo de caso aplicando alternativas para redução de consumo de combustível em uma usina de 1,8 MW dos Sistemas Isolados. Esta usina foi escolhida por possuir características de potência e de infraestrutura semelhantes a 59% das usinas existentes, de acordo com o diagnóstico realizado nesta dissertação. Os cenários realizados empregam o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC – *Organic Rankine Cycle*), o qual utiliza a Recuperação de Calor Residual (WHR – *Waste Heat Recovery*) dos gases de exaustão dos grupos geradores a diesel da usina para produzir eletricidade, juntamente com painéis solares para adição de energia solar Fotovoltaica (PV – *Photovoltaic*) de modo a reduzir o consumo de combustível global da usina, numa tentativa de adequar o consumo específico aos limites impostos pela legislação.

**Palavras-chave:** Sistemas Isolados, Ciclo Orgânico de Rankine – ORC, Recuperação do Calor de Exaustão – WHR, Energia Fotovoltaica – PV e Consumo Específico.

## Abstract

The North or, to be more precise, large areas belonging to the territory known as Amazônia Legal remained, over the years, in terms of natural obstacles and logistical barriers, associated with major geographic expanses, dependent on subsidy from fossil fuels (diesel, fuel oil and natural gas) so that the decentralized thermal generation could meet consumer needs in those areas. However, in order to reduce the diesel consumption of plants in isolated systems in recent years (and especially since 2014), the Brazilian national electric energy agency (ANEEL) has been restricting the limits of consumption of fuel within specifically defined limits for Power plants. This measure requires that plants adopt more efficient generating units, ie with low fuel consumption and operating and maintenance procedures to ensure that their monthly fuel consumptions are below the maximum permissible limit. Given this context, this thesis carries out a diagnostic survey of thermoelectric plants diesel isolated systems identifying the features of power generating units and comparing the specific consumption of plants and their generating units. This is in accordance with manufacturers data, with defined specific consumption within applicable laws regulated by ANEEL. Then it proceeds to conduct a case study, applying alternatives to the reduction of fuel consumption in a plant of Isolated Systems 1.8 MW. This plant was chosen because it has power characteristics and infrastructure similar to 59% of existing power plants according to the diagnosis made in this dissertation. Scenarios were made employing the Organic Rankine Cycle (ORC) which uses the Waste Heat Recovery (WHR) from exhaust gasses of diesel power plant generators, plus the addition of solar energy Photovoltaic (PV) so as to reduce the fuel consumption of the power plant.

**Key words:** Stand-alone Power System - SAPS, Organic Rankine Cycle – ORC, Waste Heat Recovery – WHR, Energy Photovoltaic – PV, Specific fuel Consumption.

# SUMÁRIO

|                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                                           | <b>15</b> |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS                                                                                                    | 15        |
| 1.2 OBJETIVO                                                                                                                  | 16        |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO                                                                                                  | 16        |
| <b>2 OS SISTEMAS ISOLADOS BRASILEIROS E OPÇÕES DE GERAÇÃO PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL NAS USINAS TERMELÉTRICAS</b> | <b>18</b> |
| 2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - SEP                                                                                        | 19        |
| 2.2 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN                                                                                        | 20        |
| 2.3 OS SISTEMAS ISOLADOS – ISOL                                                                                               | 22        |
| 2.3.1 Quantitativo de Usinas por Tipo de Combustível                                                                          | 22        |
| 2.3.2 Logística de Transporte de Combustível                                                                                  | 27        |
| 2.3.3 Estrutura das Usinas nos Sistemas Isolados                                                                              | 29        |
| 2.4 ASPECTOS REGULATÓRIOS                                                                                                     | 39        |
| 2.4.1 Conta de Desenvolvimento Energético – CDE                                                                               | 40        |
| 2.4.2 Conta de Consumo de Combustível - CCC                                                                                   | 40        |
| 2.4.3 Histórico da Regulamentação nos Sistemas Isolados                                                                       | 41        |
| 2.4.4 Sistema de Coleta de Dados – SCD                                                                                        | 44        |
| 2.4.5 Reembolso dos Custos de Geração ( $R_{cc}$ )                                                                            | 45        |
| 2.4.6 A Sub-rogação à Conta de Consumo de Combustível                                                                         | 52        |
| 2.5 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI) A DIESEL                                                                                 | 54        |
| 2.5.1 Tipos de Regime de Operação (Emergência e Contínuo)                                                                     | 54        |
| 2.5.2 Influência das Condições Ambientais na Operação dos MCI                                                                 | 55        |
| 2.5.3 Consumo Específico de Combustível                                                                                       | 59        |
| 2.6 CICLO ORGÂNICO DE RANKINE - ORC                                                                                           | 61        |
| 2.7 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - PV                                                                                           | 64        |
| 2.7.1 Dimensionamento de Sistema de Geração Fotovoltaicos Isolados                                                            | 66        |
| <b>3 DIAGNÓSTICO DAS USINAS TERMELÉTRICAS DOS SISTEMAS ISOLADOS</b>                                                           | <b>68</b> |
| 3.1 INTRODUÇÃO                                                                                                                | 68        |
| 3.2 EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO NAS USINAS TERMELÉTRICAS - UTE                                                                      | 68        |
| 3.3 ESTÍMULO À REDUÇÃO DO CONSUMO DE DIESEL                                                                                   | 71        |
| 3.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MCI DOS SISTEMAS ISOLADOS- CURVAS ISO                                                          | 76        |
| 3.4.1 Curvas ISO Motores de 1 a 100 kW                                                                                        | 76        |
| 3.4.2 Curvas ISO Motores de 101 a 250 kW                                                                                      | 77        |
| 3.4.3 Curvas ISO Motores de 251 a 500 kW                                                                                      | 78        |
| 3.4.4 Curvas ISO Motores de 501 a 750 kW                                                                                      | 79        |
| 3.4.5 Curvas ISO Motores de 751 a 2500 kW                                                                                     | 80        |
| 3.4.6 Curvas ISO Motores de 2.501 a 10.000 kW                                                                                 | 80        |
| 3.4.7 Curvas ISO Motores de 10.001 a 20.000 kW                                                                                | 81        |
| 3.5 DIAGNÓSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DAS UTE E MCI                                                                                 | 82        |
| 3.6 POTENCIAL DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL                                                                            | 87        |
| 3.6.1 UTE Típica com Potência $\leq 1$ MW                                                                                     | 88        |
| 3.6.2 UTE Típica com Potência de $1 < \leq 2,5$ MW                                                                            | 89        |
| 3.6.3 UTE Típica com Potência de $2,5 < \leq 5$ MW                                                                            | 90        |
| 3.6.4 UTE Típica com Potência $> 5$ MW                                                                                        | 91        |
| <b>4 ESTUDO DE CASO – PROPOSTA DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA A USINA TERMELÉTRICA DE JACAREACANGA – PA</b>        | <b>93</b> |
| 4.1 O SISTEMA ISOLADO DE JACAREACANGA                                                                                         | 93        |
| 4.1.1 Localização                                                                                                             | 93        |
| 4.1.2 Classe de Consumidores                                                                                                  | 94        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.3 Vista Aérea do Município                                               | 95         |
| 4.1.4 Configuração dos MCI da Usina Termelétrica de Jacareacanga             | 96         |
| 4.1.5 Consumo de Combustível e Geração de Energia na Usina                   | 97         |
| 4.1.6 Curva de Carga Típica da Usina                                         | 98         |
| 4.2 ESTUDO DOS CENÁRIOS PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DA USINA      | 100        |
| 4.2.1 Consumo de Combustível para os MCI                                     | 100        |
| 4.2.2 Cenário 1 – MCI - Despacho Atual                                       | 103        |
| 4.2.3 Cenário 2 – MCI - Despacho Ótimo                                       | 105        |
| 4.2.4 Cenário 3 – MCI - Despacho Ótimo + ORC                                 | 107        |
| 4.2.5 Cenário 4 – MCI - Despacho Ótimo + ORC + PV                            | 111        |
| 4.2.6 Análises Comparativa e Econômica                                       | 113        |
| <b>5 CONCLUSÃO</b>                                                           | <b>117</b> |
| 5.1 CONCLUSÃO                                                                | 117        |
| 5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS                                            | 119        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                            | <b>120</b> |
| <b>ANEXO 1– CATÁLOGO MOTOR CUMMINS QSX15-G9</b>                              | <b>124</b> |
| <b>ANEXO 2 - MAPA DAS USINAS SISTEMAS ISOLADOS – 2015</b>                    | <b>126</b> |
| <b>ANEXO 3 – DADOS DE CONSUMO E GERAÇÃO DAS USINAS DOS SISTEMAS ISOLADOS</b> | <b>127</b> |

# Lista de Figuras

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 2-1 Estrutura básica do Sistema Elétrico de Potência – SEP</i>                                                               | 19 |
| <i>Figura 2-2 Capacidade de geração instalada por fonte no SIN</i>                                                                     | 20 |
| <i>Figura 2-3 Mapa linhas de transmissão Sistema Interligado Nacional – SIN</i>                                                        | 21 |
| <i>Figura 2-4 Quantitativo de usinas por tipo de combustível (antes da interligação de Manaus)</i>                                     | 23 |
| <i>Figura 2-5 Quantitativo de usinas por tipo de combustível (após interligação de Manaus)</i>                                         | 23 |
| <i>Figura 2-6 Número de usinas por estado</i>                                                                                          | 24 |
| <i>Figura 2-7 Mapa das usinas nos Sistemas Isolados – 2015 adaptado</i>                                                                | 25 |
| <i>Figura 2-8 Percentual de usinas de acordo com a potência</i>                                                                        | 26 |
| <i>Figura 2-9 Logística de transporte fluvial/terrestre de combustível</i>                                                             | 27 |
| <i>Figura 2-10 Tempo no transporte fluvial de combustível no estado do Amazonas</i>                                                    | 28 |
| <i>Figura 2-11 Balsa-tanque para transporte de combustível</i>                                                                         | 29 |
| <i>Figura 2-12 Diagrama das áreas da UTE</i>                                                                                           | 30 |
| <i>Figura 2-13 Estrutura básica de usina adotada na UTE Buritis</i>                                                                    | 31 |
| <i>Figura 2-14 Área de Recebimento e Tratamento de Combustível (visão1)</i>                                                            | 32 |
| <i>Figura 2-15 Área de Recebimento e Tratamento de Combustível (visão2)</i>                                                            | 32 |
| <i>Figura 2-16 Tanques de armazenamento (visão 1)</i>                                                                                  | 33 |
| <i>Figura 2-17 Tanques de armazenamento (visão 2)</i>                                                                                  | 33 |
| <i>Figura 2-18 Unidades geradoras no pátio da UTE</i>                                                                                  | 34 |
| <i>Figura 2-19 Unidades geradoras e transformadores elevadores de tensão</i>                                                           | 35 |
| <i>Figura 2-20 Subestação</i>                                                                                                          | 36 |
| <i>Figura 2-21 Casa de máquinas da UTE Triunfo em Rondônia</i>                                                                         | 37 |
| <i>Figura 2-22 Casa de máquinas da UTE Cidade Nova em Manaus</i>                                                                       | 37 |
| <i>Figura 2-23 UG na UTE Vista Alegre do Abunã em Rondônia</i>                                                                         | 38 |
| <i>Figura 2-24 UG na UTE Flores em Manaus</i>                                                                                          | 38 |
| <i>Figura 2-25 UTE em Moçambique</i>                                                                                                   | 39 |
| <i>Figura 2-26 Pontos principais da Regulamentação nos Sistemas Isolados</i>                                                           | 40 |
| <i>Figura 2-27 Esquema da Equação de reembolso expandida</i>                                                                           | 46 |
| <i>Figura 2-28 Custos totais de geração – exemplo numérico</i>                                                                         | 47 |
| <i>Figura 2-29 Curvas de degradação de potência motor QSK23-G3</i>                                                                     | 57 |
| <i>Figura 2-30 Curva característica de consumo específico de combustível - Grupo gerador Cummins QSX15- G9</i>                         | 60 |
| <i>Figura 2-31 Ciclo Orgânico de Rankine</i>                                                                                           | 61 |
| <i>Figura 2-32 Diagrama T-s para água e diferentes fluidos orgânicos</i>                                                               | 62 |
| <i>Figura 2-33 Custo específico de sistemas ORC</i>                                                                                    | 63 |
| <i>Figura 2-34 Hierarquia fotovoltaica</i>                                                                                             | 64 |
| <i>Figura 2-35 Arranjo série/paralelo de módulos fotovoltaicos</i>                                                                     | 65 |
| <i>Figura 2-36 Atlas solarimétrico do Brasil</i>                                                                                       | 66 |
| <i>Figura 3-1 – Medidor de energia- SCD, a) operando - usina no Pará e b) queimado – usina em Roraima</i>                              | 69 |
| <i>Figura 3-2 - Fluxômetro para medição de combustível a) operando e calibrado – usina no Pará e b) inoperante – usina no Amazonas</i> | 69 |
| <i>Figura 3-3 Desempenho das usinas em relação ao consumo específico limitante da ANEEL</i>                                            | 71 |
| <i>Figura 3-4 Consumo específico de geradores diesel em carga plena (carregamento = 100%) em função da potência nominal</i>            | 72 |
| <i>Figura 3-5 Consumo específico de geradores diesel em 75% de carga plena (carregamento = 75%) em função da potência nominal</i>      | 73 |
| <i>Figura 3-6 Consumo específico de geradores diesel em 50% de carga plena (carregamento = 50%) em função da potência nominal</i>      | 73 |
| <i>Figura 3-7 Evolução dos limites de consumo específico</i>                                                                           | 75 |
| <i>Figura 3-8 Curvas ISO MCI de 1 a 100 kW</i>                                                                                         | 77 |
| <i>Figura 3-9 Curvas ISO MCI de 101 a 250 kW</i>                                                                                       | 78 |
| <i>Figura 3-10 Curvas ISO MCI de 251 a 500 kW</i>                                                                                      | 79 |
| <i>Figura 3-11 Curvas ISO MCI de 501 a 750 kW</i>                                                                                      | 79 |
| <i>Figura 3-12 Curvas ISO MCI de 751 a 2.500 kW</i>                                                                                    | 80 |
| <i>Figura 3-13 Curvas ISO MCI de 2.501 a 10.000 kW</i>                                                                                 | 81 |

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Figura 3-14 Curvas ISO MCI de 10.001 a 20.000 kW</i>                                                                                    | 81  |
| <i>Figura 3-15 Quantitativo de UTE por potência</i>                                                                                        | 83  |
| <i>Figura 3-16 Quantitativo de unidades UG potência</i>                                                                                    | 84  |
| <i>Figura 3-17 Unidades geradoras por UTE</i>                                                                                              | 85  |
| <i>Figura 3-18 Potência média das unidades geradoras</i>                                                                                   | 86  |
| <i>Figura 3-19 Comparação entre Limite de consumo específico Aneel e unidade geradora média</i>                                            | 87  |
| <i>Figura 3-20 Potencial de redução de combustível (UTE <math>\leq</math> 1MW)</i>                                                         | 88  |
| <i>Figura 3-21 Potencial de redução de combustível (UTE de <math>1 &lt; a \leq 2,5</math> MW)</i>                                          | 89  |
| <i>Figura 3-22 Potencial de redução de combustível (UTE de <math>2,5 &lt; a \leq 5</math> MW)</i>                                          | 90  |
| <i>Figura 3-23 Eficiência das UTE (Potência instalada <math>&gt; 5</math> MW)</i>                                                          | 91  |
| <i>Figura 4-1 Mapa do Pará – detalhe para Jacareacanga</i>                                                                                 | 94  |
| <i>Figura 4-2 Consumidores por classe de consumo, elaboração própria com base em dados coletados durante inspeção na localidade (2013)</i> | 95  |
| <i>Figura 4-3 Vista aérea do centro de Jacareacanga</i>                                                                                    | 95  |
| <i>Figura 4-4 Rio Tapajós</i>                                                                                                              | 96  |
| <i>Figura 4-5 Unidades geradoras de Jacareacanga</i>                                                                                       | 97  |
| <i>Figura 4-6 Aquisição das medidas de demanda - RMS MARH-21</i>                                                                           | 98  |
| <i>Figura 4-7 Curva de Carga de um dia típico - UTE Jacareacanga</i>                                                                       | 99  |
| <i>Figura 4-8 Tela do software – OTSI</i>                                                                                                  | 101 |
| <i>Figura 4-9 Cálculo do consumo de combustível para o motor QSX15-G9</i>                                                                  | 102 |
| <i>Figura 4-10 Despacho dos MCI (cenário atual)</i>                                                                                        | 103 |
| <i>Figura 4-11 Fator de carregamento dos MCI (cenário atual)</i>                                                                           | 104 |
| <i>Figura 4-12 Despacho dos MCI (despacho ótimo)</i>                                                                                       | 105 |
| <i>Figura 4-13 Fator de carregamento dos MCI (despacho ótimo)</i>                                                                          | 106 |
| <i>Figura 4-14 Modelagem do MCI + ORC</i>                                                                                                  | 108 |
| <i>Figura 4-15 Despacho dos MCI + Despacho ótimo + ORC</i>                                                                                 | 109 |
| <i>Figura 4-16 Fator de carregamento dos MCI + Despacho ótimo + ORC</i>                                                                    | 110 |
| <i>Figura 4-17 Despacho dos MCI + Despacho ótimo + ORC + PV</i>                                                                            | 111 |
| <i>Figura 4-18 Fator de carregamento dos MCI + Despacho ótimo + ORC + PV</i>                                                               | 112 |
| <i>Figura 4-19 Análise comparativa dos cenários</i>                                                                                        | 113 |
| <i>Figura 4-20 Porcentagem que as usinas excedem limite de consumo específico dos Sistemas Isolados por faixa de potência</i>              | 114 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Tabela 2-1 Consumo Anual de combustível nos Sistemas Isolados no Brasil .....</i>                                                 | <i>18</i>  |
| <i>Tabela 2-2 Número de UTE por faixa de potência .....</i>                                                                          | <i>26</i>  |
| <i>Tabela 2-3 – Limites de Consumo Específico mensal definido pela ANELL por Potência Instalada nas usinas baseadas em MCI .....</i> | <i>49</i>  |
| <i>Tabela 2-4 Preço médio de referência do diesel nas regiões .....</i>                                                              | <i>50</i>  |
| <i>Tabela 2-5 Preço médio de referência do diesel nos estados da região norte .....</i>                                              | <i>50</i>  |
| <i>Tabela 2-6 Referência para o custo de geração de usina termelétrica a diesel nos Sistemas Isolados .....</i>                      | <i>51</i>  |
| <i>Tabela 2-7 Regime de operação motor Cummins QSX15-G9 .....</i>                                                                    | <i>55</i>  |
| <i>Tabela 2-8 Exemplo de fatores de degradação de MCI .....</i>                                                                      | <i>58</i>  |
| <i>Tabela 2-9 Principais fabricantes e faixa de potência dos módulos ORC .....</i>                                                   | <i>63</i>  |
| <i>Tabela 2-10 Principais empresas de PV .....</i>                                                                                   | <i>67</i>  |
| <i>Tabela 3-1 Combustível reembolsado nos Sistemas Isolados - Dez 2014 .....</i>                                                     | <i>71</i>  |
| <i>Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Tabela 3-2 .....</i>                                                              | <i>75</i>  |
| <i>Tabela 3-3 Evolução dos limites de consumo específico .....</i>                                                                   | <i>75</i>  |
| <i>Tabela 3-4 UTE típica para potência <math>\leq 1</math> MW .....</i>                                                              | <i>89</i>  |
| <i>Tabela 3-5 UTE típica para potência de <math>1 &lt; a \leq 2,5</math> MW .....</i>                                                | <i>90</i>  |
| <i>Tabela 3-6 UTE típica para potência de <math>2,5 &lt; a \leq 5</math> MW .....</i>                                                | <i>90</i>  |
| <i>Tabela 3-7 UTE típica para potência <math>&gt; 5</math> MW .....</i>                                                              | <i>91</i>  |
| <i>Tabela 4-1 Configuração do Parque termelétrico .....</i>                                                                          | <i>96</i>  |
| <i>Tabela 4-2 Consumo de diesel na usina de Jacareacanga .....</i>                                                                   | <i>98</i>  |
| <i>Tabela 4-3 Análise do Cenário 1 .....</i>                                                                                         | <i>104</i> |
| <i>Tabela 4-4 Análise do Cenário 2 .....</i>                                                                                         | <i>106</i> |
| <i>Tabela 4-5 Análise do Cenário 3 .....</i>                                                                                         | <i>110</i> |
| <i>Tabela 4-6 Análise do Cenário 4 .....</i>                                                                                         | <i>112</i> |
| <i>Tabela 4-7 Custo de Investimento em ORC e PV .....</i>                                                                            | <i>115</i> |
| <i>Tabela 4-8 Análise comparativa de economia de combustível (diesel) .....</i>                                                      | <i>115</i> |
| <i>Tabela 4-9 Análise econômica implantação ORC .....</i>                                                                            | <i>116</i> |
| <i>Tabela 4-10 Análise econômica implantação PV .....</i>                                                                            | <i>116</i> |

## Lista de Abreviaturas

|                 |                                                                            |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| A               | Ampere                                                                     |
| ACRmed          | Ambiente de Contratação Regulada - valor de referência de energia elétrica |
| ANEEL           | Agência Nacional de Energia Elétrica                                       |
| ANP             | Agência Nacional de Petróleo                                               |
| CCC             | Conta de Consumo de Combustível                                            |
| CCEE            | Câmara de Comercio de Energia Elétrica                                     |
| CDE             | Conta de Desenvolvimento Energético                                        |
| CT <sub>G</sub> | Custo Total de Geração                                                     |
| CTM             | Comitê Técnico de Mercado/Eletrobras                                       |
| CTP             | Comitê Técnico de Planejamento/Eletrobras                                  |
| EPE             | Empresa de Pesquisa Energética                                             |
| GTON            | Grupo Técnico Operacional da Região Norte                                  |
| ISOL            | Sistemas Isolados Brasileiros                                              |
| L/kWh           | Consumo Específico                                                         |
| MCI             | Motor de Combustão Interna                                                 |
| ORC             | Ciclo Orgânico de Rankine                                                  |
| PV              | Geração Solar Fotovoltaica                                                 |
| R245fa          | Fluido Orgânico - Pentafluopentano                                         |
| Rccc            | Reembolso dos Custos Totais de Geração                                     |
| SCD             | Sistemas de Coleta de Dados                                                |
| SEP             | Sistemas Elétrico de Potência                                              |
| SIN             | Sistemas Interligado Nacional                                              |
| V               | Volt                                                                       |
| VPL             | Valor Presente Líquido                                                     |
| W               | Watt                                                                       |
| TMA             | Taxa Mínima de Atratividade                                                |
| TMA             | Taxa Interna de Retorno                                                    |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro é composto por dois sistemas de características distintas, denominados Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados (ISOL). O primeiro, de grande porte e de característica hidrotérmica, possui uma vasta rede de transmissão que interliga as usinas de geração às subestações de carga e se estende por todas as regiões do Brasil, com exceção de grande parte da região Norte e poucas localidades da região Centro-Oeste. Já o segundo, é de característica predominantemente térmica, onde os sistemas de geração são, em geral, de pequeno porte e específicos de cada localidade, não existindo redes elétricas de conexão (linhas de transmissão, subtransmissão) entre dois ou mais sistemas, inclusive com o Sistema Interligado Nacional, sendo, por isso, chamados de Sistemas Isolados (ONS, 2014).

A região Norte ou, mais precisamente, grandes áreas pertencentes à Amazônia Legal, permaneceram, ao longo dos anos, por questões de obstáculos naturais e barreiras logísticas, associadas às grandes extensões geográficas, dependentes de subsídio aos combustíveis fósseis (diesel, óleo combustível e gás natural) para que a geração termelétrica descentralizada pudesse atender os consumidores daquelas regiões (Portal do Governo Federal, 2011), (IBGE, 2014).

Atualmente, os Sistemas Isolados no Brasil são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica a 231 localidades distribuídas nos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Amapá e Mato Grosso, bem como à ilha de Fernando de Noronha (PO ELETROBRAS, 2015).

Estas usinas consomem, anualmente, cerca de 1 bilhão de litros de diesel para fornecer eletricidade às regiões remotas. Neste contexto, para que o custo da geração nestes locais possa atender aos consumidores da região Norte com tarifas uniformizadas e compatíveis às praticadas no Sistema Interligado do restante do país, leis e decretos foram sendo criados e atualizados para viabilizar a geração na região e, ao mesmo tempo, incentivar a eficiência.

Dentro deste contexto, observa-se a necessidade de um diagnóstico da eficiência das usinas termelétricas de acordo com a legislação vigente e, após este diagnóstico, propor alternativas energéticas para a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases agravantes do efeito estufa.

O espaço amostral das usinas a serem analisadas é composto por 122 usinas termelétricas a diesel operando com Motores de Combustão Interna (MCI) que possuem Sistema Eletrônico de Coleta de Dados (SCD) implantado. Este sistema permite o envio mensal de dados de consumo de combustível e geração de energia para o banco de dados gerenciado pela Eletrobras. Estes dados são públicos, disponibilizados no site da empresa e repassados para a Agência Nacional de Energia

Elétrica (ANEEL), (SCD ELB, 2014).

Por fim, após a análise das usinas mencionadas, será efetuado um estudo de caso de aplicação de alternativas para redução de consumo de combustível em uma usina de 1,8 MW. Esta usina possui características de potência e de infraestrutura semelhante a 59% das usinas existentes nos Sistemas Isolados, motivo pela qual foi escolhida.

## 1.2 Objetivo

Os objetivos desta dissertação são realizar o diagnóstico das usinas termelétricas dos Sistemas Isolados do ponto de vista de adequação aos limites de consumo específico de combustível estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aliado à proposição de alternativas para redução dos mesmos.

Relativo às alternativas de redução do consumo específico destas usinas, um estudo de caso será realizado empregando o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC – *Organic Rankine Cycle*), o qual utiliza a Recuperação de Calor Residual (WHR - *Waste Heat Recovery*) dos gases de exaustão dos grupos geradores à diesel da usina, juntamente com a adição de energia solar com painéis Fotovoltaicos (PV – *Photovoltaic*), de modo a reduzir o consumo de combustível global da usina.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao assunto abordado, além dos objetivos e escopo do trabalho. Na sequência, são apresentados os demais capítulos com um resumo do que será abordado em cada um deles:

- O Capítulo 2 Revisão Bibliográfica – será composto por três blocos, sendo que o primeiro apresentará as características e estrutura das usinas termelétricas da Região Norte, logística de transporte de combustível e distribuição das usinas nos estados. Já o segundo bloco apresentará a legislação que regulamenta a geração nos Sistemas Isolados, estabelece limites máximo de consumo específico de combustível para cada usina, a Conta de Consumo de Combustível responsável pelo pagamento dos custos de geração nestas usinas, além de outros aspectos regulatórios. Por fim, a terceira parte apresentará os aspectos tecnológicos na geração de energia nos Sistemas Isolados, apresentando as opções tecnológicas de recuperação de calor dos gases de exaustão de motores de combustão interna aproveitados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), juntamente com a utilização da energia solar fotovoltaica (PV) como alternativas para redução do consumo de combustível nas usinas termelétricas;
- O Capítulo 3 Metodologia - apresentará um diagnóstico das usinas termelétricas dos Sistemas Isolados do ponto de vista de adequação aos limites de consumo específico de combustível

estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), análise da distribuição das usinas por faixa de potência, tipo e potência dos grupos geradores adotados nas usinas, comparação dos limites de consumo específico das usinas com valores de referência fornecido pelos fabricantes e considerações sobre o potencial de redução do consumo de combustível das usinas diante do diagnóstico realizado neste capítulo;

- Capítulo 4 Estudo de Caso – será apresentado um estudo de caso utilizando a usina termelétrica de Jacareacanga, no Pará, como modelo. Este estudo, apresentará a aplicação de opções tecnológicas para redução do consumo de combustível apresentadas no capítulo 2 e, conseqüentemente, redução do consumo específico total da usina. Para isto, o estudo será dividido em quatro cenários:

**Cenário 1:** consistirá no diagnóstico de operação da usina por meio de dados reais, tais como consumo de combustível, geração de energia, despacho de operação dos grupos geradores da usina e da curva de demanda de energia elétrica da localidade. De posse destes dados, será possível traçar o perfil de consumo de combustível e operação da usina, sendo este o cenário base do estudo realizado;

**Cenário 2:** aplicação de otimização do despacho dos grupos geradores apresentado no cenário 1, com auxílio do software de Otimização de Despacho de Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados – OTSI, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), para redução do consumo específico total da usina;

**Cenário 3:** será utilizado o sistema híbrido de geração de energia elétrica para redução do consumo específico total da usina, utilizando a Recuperação do Calor de Exaustão (WHR) dos gases de escape dos motores de combustão interna da usina, sendo os mesmos aproveitados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC); e

**Cenário 4:** será acrescentado ao sistema híbrido apresentado no cenário 3 painéis fotovoltaicos para aproveitamento da energia.

Finalmente, será realizada comparação entre os quatro cenários apresentados.

- Capítulo 5 Conclusões - apresentará as conclusões da dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 OS SISTEMAS ISOLADOS BRASILEIROS E OPÇÕES DE GERAÇÃO PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL NAS USINAS TERMELÉTRICAS

Os Sistemas Isolados brasileiros (ISOL) são predominantemente térmicos e majoritariamente localizados e dispersos na Região Norte do país. São responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica aos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Amapá e Mato Grosso, bem como à ilha de Fernando de Noronha.

Em 2014, ocorreu uma grande redução da geração nos ISOL devido à interligação de Manaus ao Sistema Interligado Nacional (SIN), através da linha de transmissão Tucuruí/Manaus. Mesmo com esta redução, a geração atendeu à demanda média de 433 MW gerando 5.441.806 MWh em 2014, distribuídos em 231 localidades. Para esta geração, o consumo de diesel foi da ordem de 1 bilhão de litros no ano, e 6 milhões de m<sup>3</sup> de gás natural (Tabela 2-1).

Tabela 2-1 Consumo Anual de combustível nos Sistemas Isolados no Brasil

| <b>Consumo de Combustível Anual nos Sistemas Isolados</b> |               |               |
|-----------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                                                           | <b>2013</b>   | <b>2014</b>   |
| Demanda média (MW)                                        | 1.219         | 433           |
| Energia (MWh)                                             | 13.496.485    | 5.441.806     |
| Óleo Diesel (l)                                           | 1.531.692.274 | 1.079.444.664 |
| Óleo Comb. (ton)                                          | 208.495       | -             |
| Gás Natural (m <sup>3</sup> )                             | 1.042.603.891 | 6.526.827     |

Fonte: elaboração própria a partir dos dados de consumo e geração de energia (AEC, 2014; AEC, 2013)

Para melhor compreensão dos Sistemas Isolados, a revisão bibliográfica será apresentada em 3 blocos:

1. Diferença entre os SIN e ISOL, distribuição das usinas termelétricas nos estados, estrutura típica encontrada nas usinas, logística do transporte de combustível e potência instalada. Espera-se, com isto, apresentar as principais características que tornam a geração de energia nestas regiões diferente das demais;
2. Aspectos regulatórios do setor, o Fundo Setorial que subsidia a geração de energia nas comunidades não conectadas ao SIN através da Conta de Consumo de Combustível – CCC; a Resolução Normativa nº 427 da ANEEL, a qual apresenta os cálculos para reembolso dos custos totais de geração, juntamente com os limites de consumo específico de combustível para geração de energia nos ISOL, além de estimular o uso de fontes alternativas para a substituição parcial ou total do consumo de combustível fóssil;

3. Considerações sobre as tecnologias empregadas na geração de energia atualmente nos ISOL e a adoção de alternativas de redução do consumo de combustível, que consistem na recuperação do calor residual dos gases de escape dos Motores de Combustão Interna (MCI) para utilização no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) e o uso da energia solar por meio dos painéis fotovoltaicos (PV).

## 2.1 Sistema Elétrico de Potência - SEP

O sistema elétrico brasileiro constitui um Sistema Elétrico de Potência (SEP), o qual é caracterizado pelo grande porte das instalações e cobertura de uma significativa área geográfica, englobando a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

A Figura 2-1 exemplifica um SEP típico, onde geração é a etapa inicial do processo que transforma a energia oriunda de fontes primárias (hidráulica, combustível fóssil, energia nuclear e biomassa) em energia elétrica.

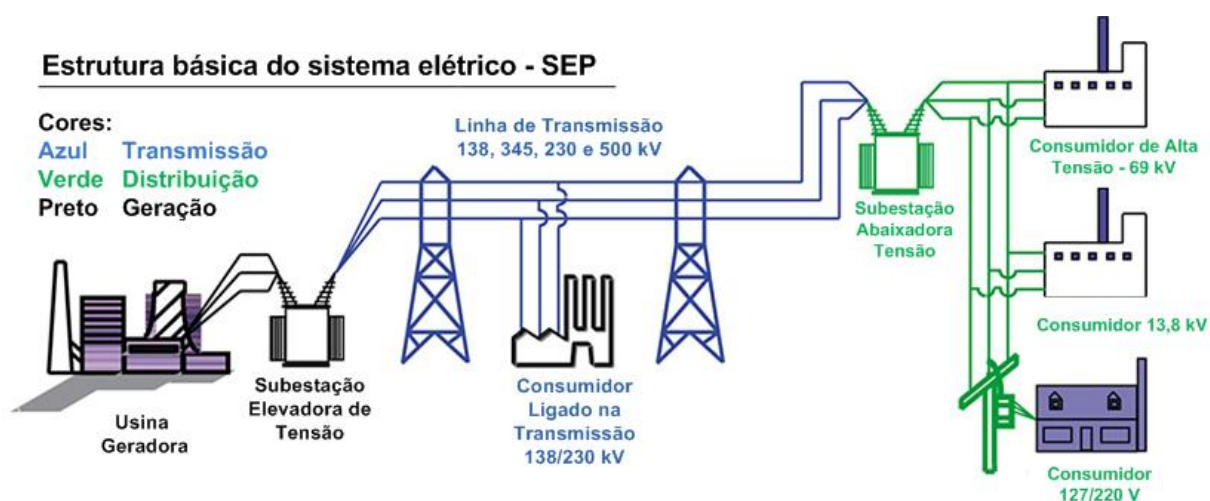


Figura 2-1 Estrutura básica do Sistema Elétrico de Potência – SEP

Fonte: Adaptado de Idaho (2015)

Através da subestação elevadora, eleva-se os níveis de tensão normalmente de 13,8 kV para 138, 230, 345, ou 500 kV utilizadas nas linhas de transmissão. Esta elevação dos níveis de tensão ocorre para reduzir as perdas de energia durante a transmissão de grandes blocos de energia até os centros consumidores. As linhas de transmissão são classificadas como linhas curtas, médias ou longas. As linhas de transmissão curtas são aquelas de até 80 km, as linhas médias são aquelas que possuem de 80 a 240 km e as linhas longas são as maiores de 240 km. Após o transporte da energia elétrica até os centros consumidores, os níveis de tensão devem ser reduzidos para níveis mais seguros dentro das subestações abaixadoras. Para este processo, dá-se o nome de distribuição primária. A distribuição secundária ocorre depois dos transformadores, onde acontece novo rebaixamento.

Esta é a rede de distribuição de baixa tensão que chega aos consumidores.

## 2.2 Sistema Interligado Nacional - SIN

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte (ONS, 2014).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2022, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o SIN possui uma capacidade instalada de 124.610 MW (Figura 2-2). Do total da potência instalada, 64% advêm da geração hídrica e 15% térmica, que o caracteriza como um sistema hidrotérmico. Ressaltando que as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) não são incluídas neste percentual de geração hídrica (PDE-EPE, 2014).

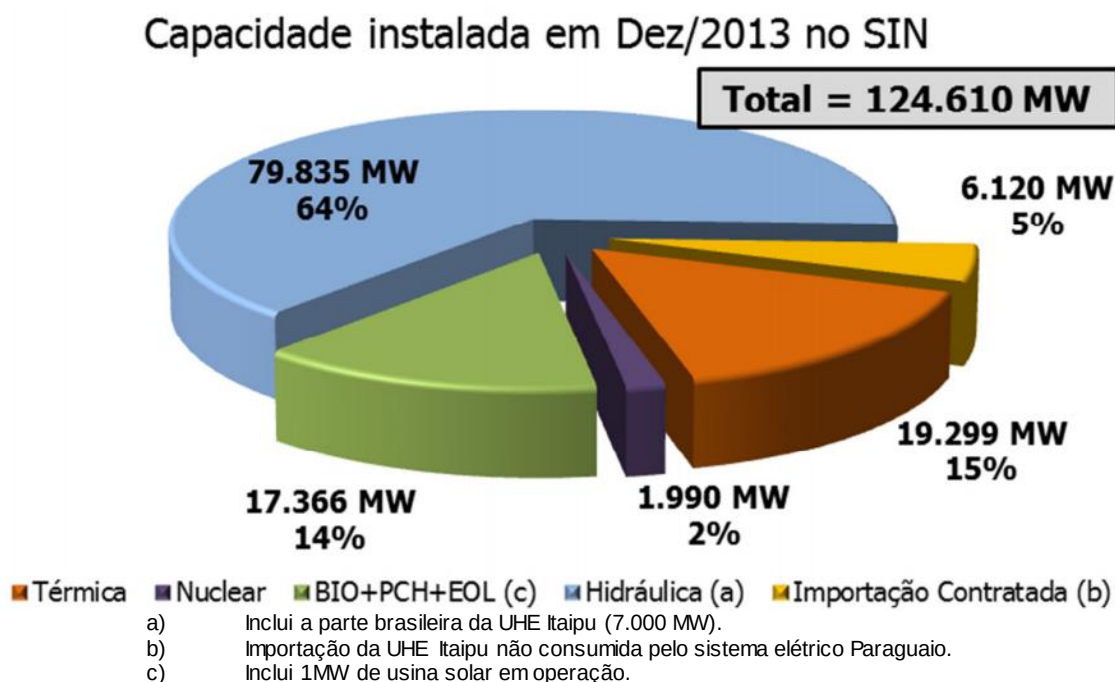


Figura 2-2 Capacidade de geração instalada por fonte no SIN

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2014)

A capacidade instalada é distribuída no território nacional conforme a Figura 2-3, que apresenta o Sistema de Transmissão 2015, o qual possui grande densidade de linhas de transmissão nas regiões Sul e Sudeste, em oposição à baixa densidade ou inexistência de linhas de transmissão na Região Norte, onde estão situados os Sistemas Isolados.

As principais subestações de carga, que atendem as regiões mais densamente povoadas e industrializadas, não estão localizadas próximas das centrais de geração. Estas características foram determinantes para a implantação, ao longo de vários anos, de um sistema de transmissão de longa distância, bem como a definição da topologia atual do SIN.

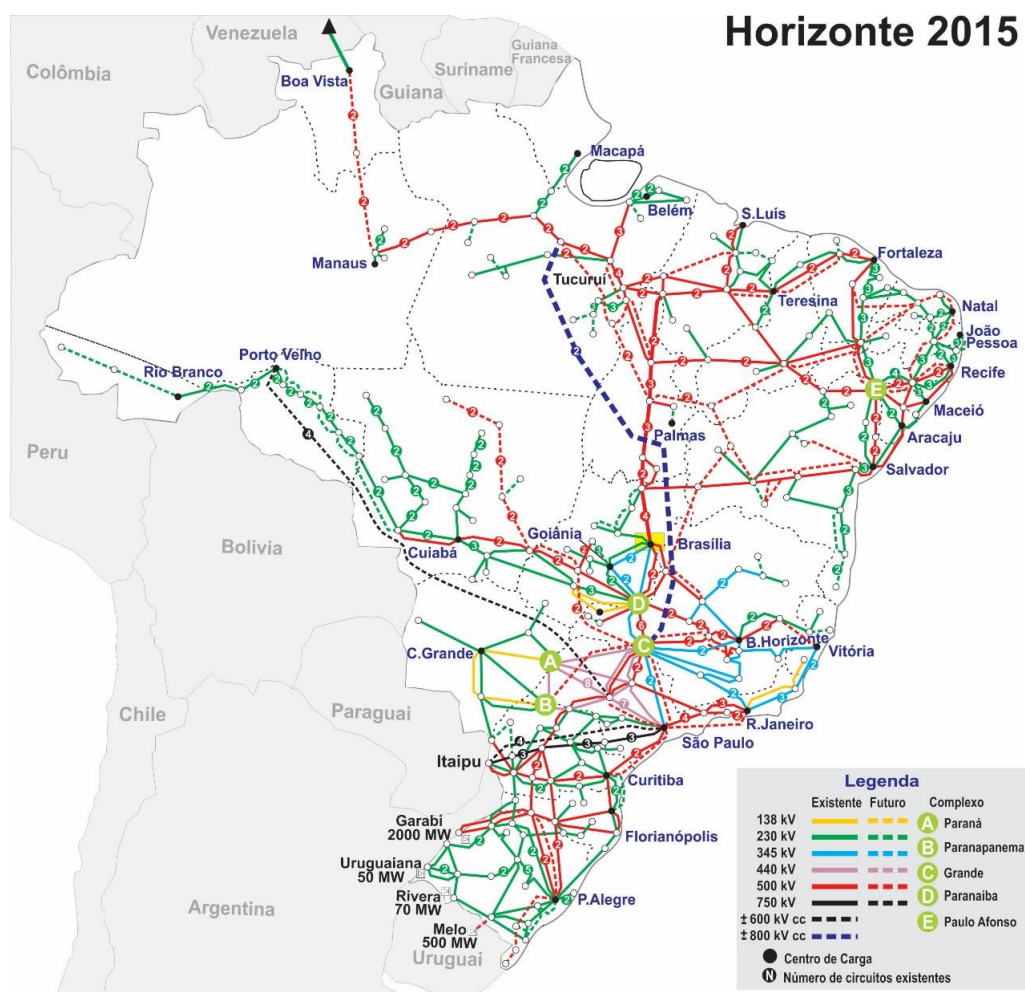


Figura 2-3 Mapa linhas de transmissão Sistema Interligado Nacional – SIN

Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS (2014)

Vale ressaltar na Figura 2-3 a grande região sem linhas de transmissão no Norte e no Centro- Oeste onde estão localizadas as usinas dos Sistemas Isolados.

## 2.3 Os Sistemas Isolados – ISOL

A geração de energia nos sistemas eletricamente isolados apresentam características distintas da geração de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), tanto do ponto de vista regional, bem como da legislação que o regulamenta. Em geral, a energia elétrica é fornecida normalmente por grupos geradores baseados em Motores de Combustão Interna (MCI), com várias unidades geradoras de pequeno porte operando em paralelo. Estes sistemas são localizados, em sua maioria, na região amazônica e por isto, apresentam restrições de acesso dificultando a logística de abastecimento de combustível e manutenção devido às grandes distâncias dos centros de abastecimento e falta de estradas e ruas pavimentadas, pois muitas destas comunidades não possuem acesso por terra por serem formadas nas margens dos rios, no meio da floresta amazônica, as quais são chamadas de comunidades ribeirinhas.

### 2.3.1 Quantitativo de Usinas por Tipo de Combustível

Em 2014, ocorreu a interligação do sistema Manaus através da linha de transmissão de Tucuruí – Manaus, que entrou em funcionamento parcial com 1.800 km de extensão, da hidrelétrica de Tucuruí, no Pará, até Macapá, no Amapá, alcançando Manaus, no Amazonas (Figura 2-3). Gradualmente, o aumento da potência elétrica entregue ao sistema Manaus está substituindo o consumo de combustível fóssil, conforme apresentado na Tabela 2-1. Além disso, a interligação do sistema Manaus ao Sistema Interligado Nacional (SIN) fez com que as usinas termelétricas de Manaus fossem despachadas através do Operador Nacional do Sistema (ONS). Deste modo, exclui-se as usinas de Manaus dos Sistemas Isolados, ou seja, elas passaram a operar pelas regras e legislação do interligado. Esta informação é importante ressaltar para não haver dúvidas de quais usinas pertencem aos Sistemas Isolados, tendo em vista este momento de transição devido à interligação.

As Figuras 2-4 e 2-5 apresentam as usinas por tipo de combustível antes da interligação de Manaus e após interligação, respectivamente, nos Sistemas Isolados.

Após a interligação, as usinas a Óleo Combustível que operavam em Manaus deixaram de operar, juntamente com algumas que foram desativadas. Já as usinas a Gás Natural continuam operando, porém agora no Sistema Interligado. Deste modo, houve a redução de 259 para 231 usinas nos Sistemas Isolados.

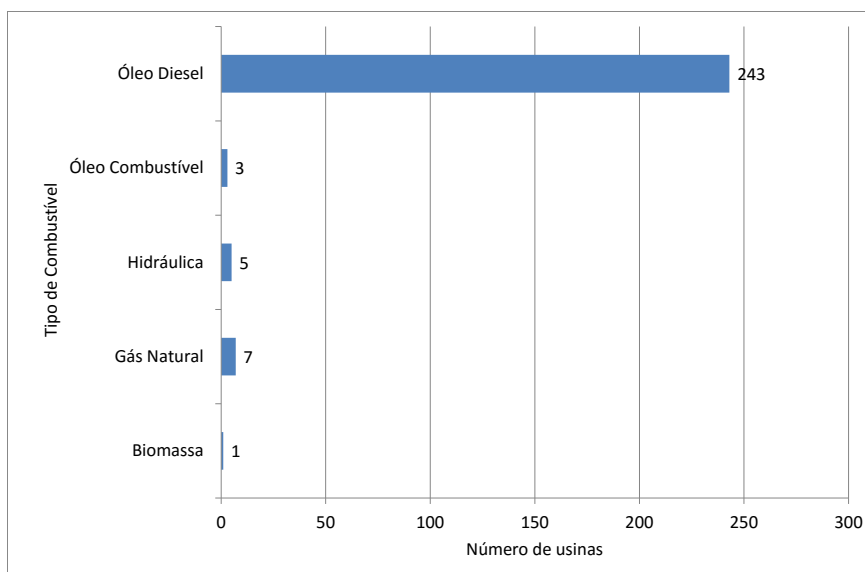


Figura 2-4 Quantitativo de usinas por tipo de combustível (antes da interligação de Manaus)

Fonte: Sistema de Coleta de Dados - SDC (2014)

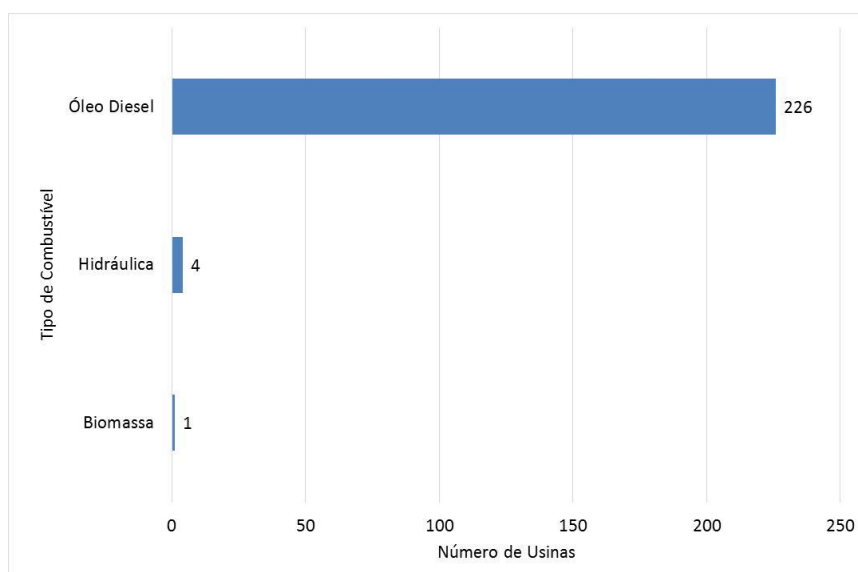


Figura 2-5 Quantitativo de usinas por tipo de combustível (após interligação de Manaus)

Fonte: Sistema de Coleta de Dados - SDC (2014)

Como um dos objetivos da dissertação é a redução do consumo de diesel nas usinas termelétricas, no decorrer da dissertação são avaliadas somente as usinas termelétricas a óleo diesel dos Sistemas Isolados após a interligação de Manaus, ou seja, as 226 usinas termelétricas. Estas usinas estão ordenadas em ordem decrescente de acordo como os estados em que estão localizadas conforme a Figura 2-6.

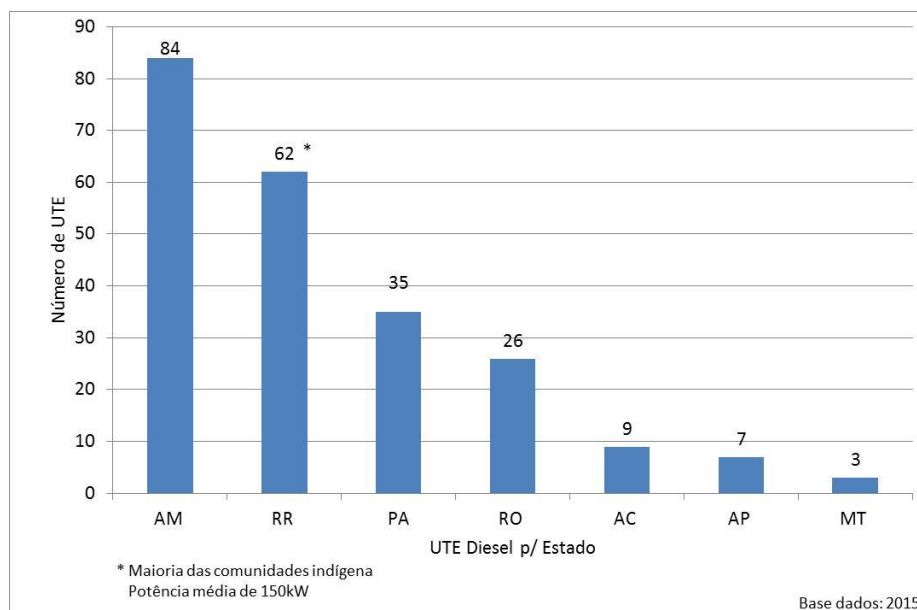


Figura 2-6 Número de usinas por estado

Fonte: Sistema de Coleta de Dados - SDC (2014)

A Figura 2-7 é uma adaptação do mapa dos Sistemas Isolados, o qual foi retirado os nomes das usinas e ampliado o marcador (pontos vermelhos no mapa) para facilitar a visualização do quantitativo e localização das usinas dos Sistemas Isolados. As usinas estão localizadas em sua maioria ao longo dos cursos dos rios onde as comunidades foram sendo formadas ao longo dos anos.

A menor usina possui 6 kW de potência instalada (maloca indígena de Santa Cruz no interior de Roraima) e a maior com 62.400 kW (usina Santana Wärtisilla na capital do Amapá).

Diante desta gama de usinas, estas foram divididas em faixas de potência, conforme apresentado na Figura 2-8, agrupando as usinas com características e particularidades construtivas semelhantes, tendo em vista que as estruturas de uma usina de 100 kW, por exemplo, são diferentes de uma usina de 20.000 kW. Existe, neste caso, diferença nas unidades geradoras, no sistema de abastecimento de combustível, na complexidade de manutenção, na sala de operação entre outras.

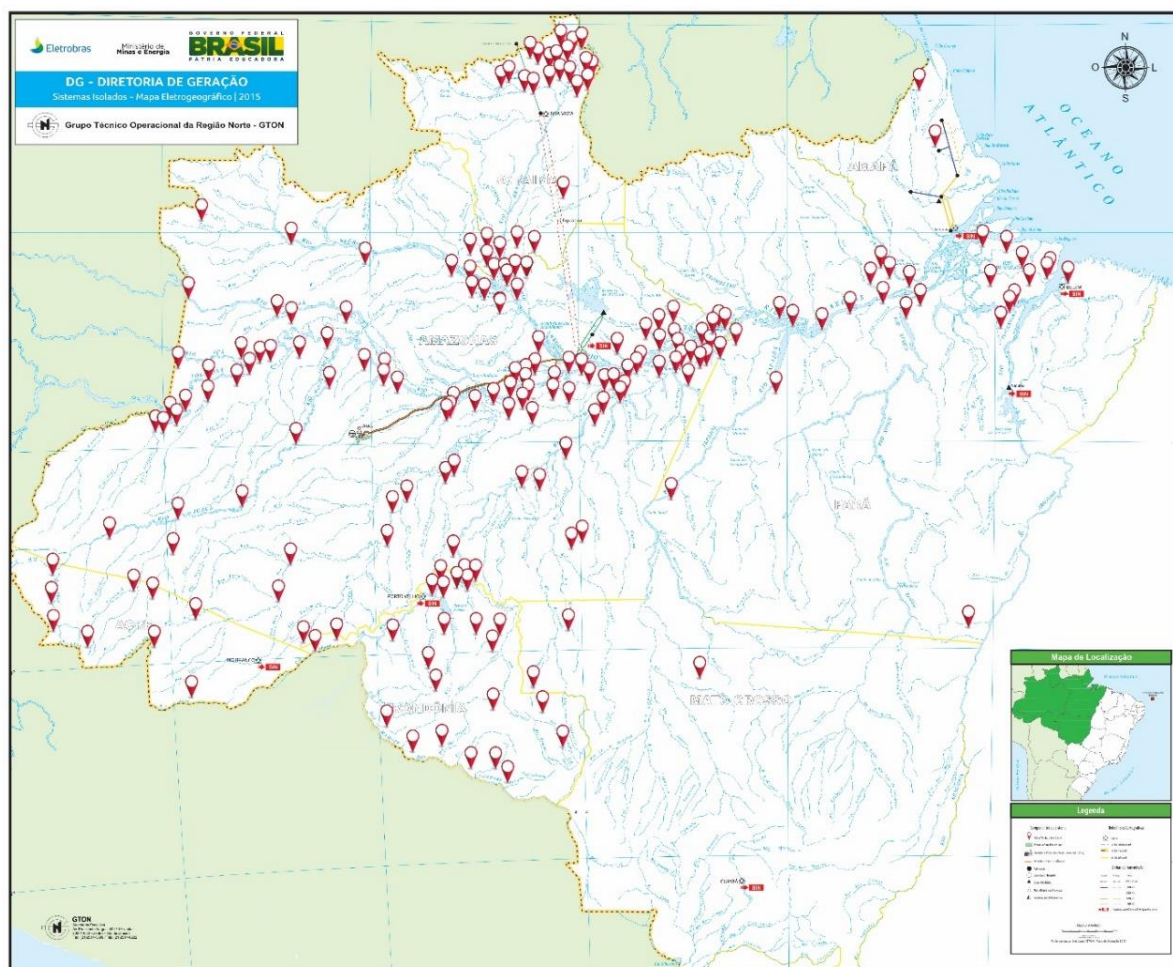


Figura 2-7 Mapa das usinas nos Sistemas Isolados – 2015 adaptado

Fonte: Mapa Eletrobras (2015)

Ressalta-se que o banco de dados detalhado que originou a Figura 2-8 consta no Anexo 3, apresentando uma tabulação adaptada com a potência de cada grupo gerador, número de unidades geradoras e a potência total de cada usina dos Sistemas Isolados baseados no Plano Anual de Operação da Eletrobras, que reúne as informações de todos os agentes geradores dos Sistemas Isolados (PO ELETROBRAS, 2015).

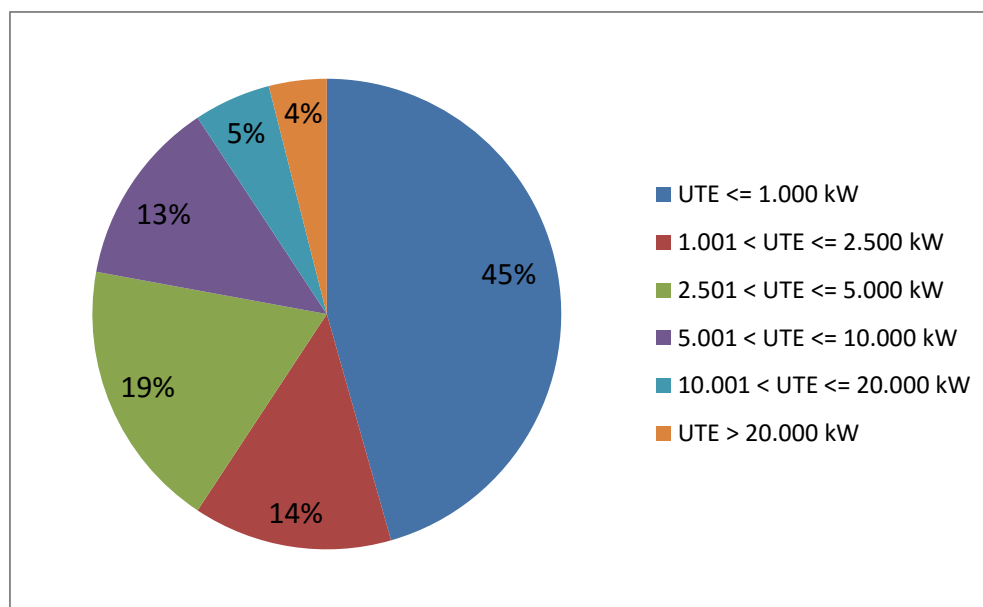


Figura 2-8 Percentual de usinas de acordo com a potência

Fonte: Plano de Operação das UTE dos Sistemas Isolados (2015)

Conforme observado na Figura 2-8, as usinas menores que 1.000 kW representam a grande maioria do universo dos Sistemas Isolados. Considerando as usinas menores que 2.500 kW, obtém-se o percentual de 59% das usinas, fato que auxilia na tomada de decisão de políticas e planejamento de projetos de geração prioritários para usinas com potência até 2.500 kW.

A Tabela 2-2 apresenta o quantitativo das usinas em cada faixa de potência conforme apresentado em percentual na Figura 2-8.

Tabela 2-2 Número de UTE por faixa de potência

| Número de UTE por Faixa de Potência |            |
|-------------------------------------|------------|
| UTE ≤ 1.000 kW                      | 103        |
| 1.001 < UTE ≤ 2.500 kW              | 31         |
| 2.501 < UTE ≤ 5.000 kW              | 42         |
| 5.001 < UTE ≤ 10.000 kW             | 29         |
| 10.001 < UTE ≤ 20.000 kW            | 12         |
| UTE > 20.000 kW                     | 9          |
| <b>Total</b>                        | <b>226</b> |

Fonte: Elaboração própria a partir de PO ELETROBRAS (2014)

### 2.3.2 Logística de Transporte de Combustível

No que concerne à logística de abastecimento de combustível, tem-se não apenas o transporte rodoviário, mas na maioria das vezes, a utilização da navegação fluvial.

Historicamente, os Sistemas Isolados têm sido atendidos pelas próprias Distribuidoras ou por Produtores Independentes de Energia – PIE, através de sistemas geradores alimentados a óleo diesel.

A Figura 2-9 apresenta os principais modais de transporte de combustível utilizados pela Petrobras Distribuidora na região Norte e conseqüentemente para atender as usinas dos Sistemas Isolados. Onde os traçados em azul são referentes ao transporte de combustível em balsa-tanque por navegação fluvial. Os deslocamentos em amarelo com pontilhados são referentes ao transporte de combustível em caminhão-tanque por rodovias e os símbolos BR são os terminais aquaviários/bases de abastecimento que concentram grandes volumes de combustível.

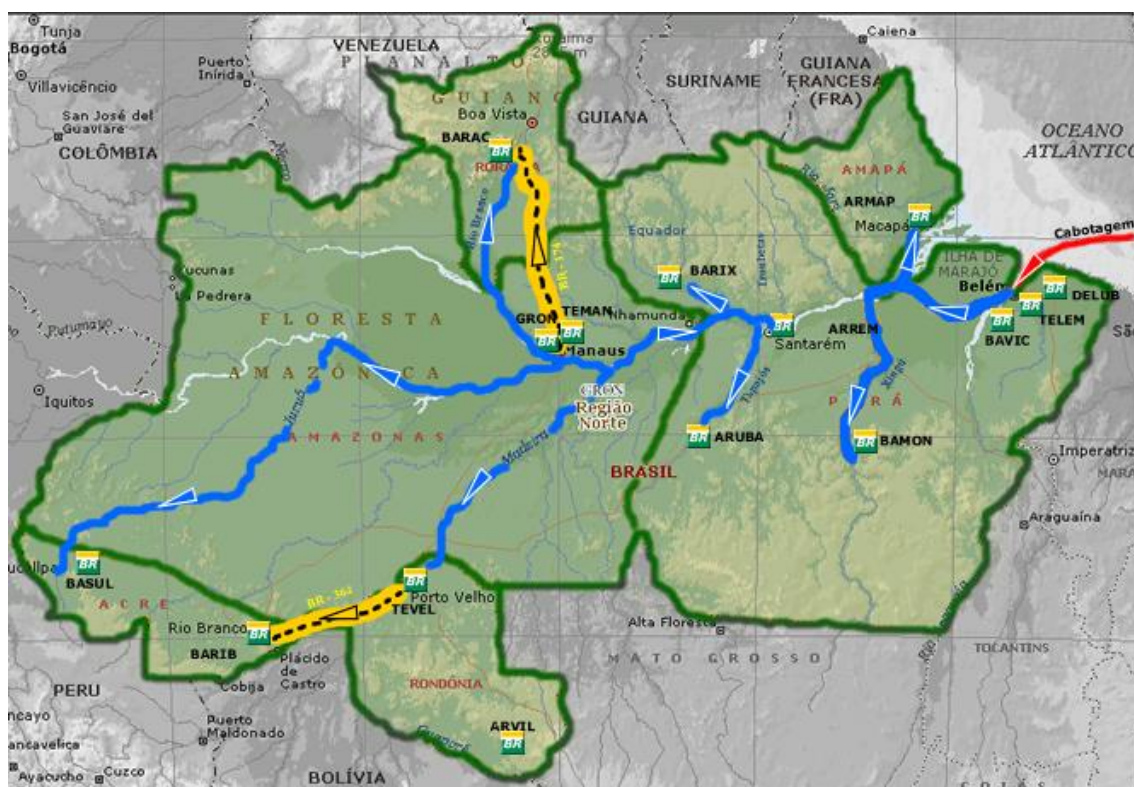


Figura 2-9 Logística de transporte fluvial/terrestre de combustível

Fonte: BR Distribuidora (2012)

Este transporte é, muitas vezes, demorado. Por exemplo, de Manaus a Yauaretê, ao longo do rio Negro, são 14 dias de balsa-tanque, como pode ser observado na Figura 2-10. Esta situação obriga as usinas a manterem tancagem de armazenamento de combustível suficiente para que o estoque atenda à geração até a próxima remessa de combustível. Esta logística deve ser calculada tendo em vista que a região não dispõe de muitas empresas e balsas-tanques para efetuar o transporte. Deste

modo, cada usina deve prever o tempo que leva para a balsa se deslocar do terminal de abastecimento até a usina. Este deslocamento possui tempo elevado não somente pelo deslocamento ao longo do rio, mas também porque a balsa-tanque vai parando de cidade em cidade para abastecer outras usinas que estão no caminho. O abastecimento, por sua vez, também é demorado devido ao grande volume de combustível.



Figura 2-10 Tempo no transporte fluvial de combustível no estado do Amazonas

Fonte: Eletrobras (2008)

Outro aspecto a ser levado em conta são as grandes variações do nível dos rios na região amazônica, onde algumas localidades chegam a ficar até 4 meses sem que uma balsa-tanque possa navegar, devido ao baixo volume de água nos rios.

A Figura 2-11 é um exemplo de balsa-tanque atracada na cidade de Fonte Boa no interior do Amazonas que fica ao longo do rio Solimões. O diesel é transportado no interior da balsa (porões da balsa) e bombeado para as usinas através de oleoduto do porto até a usina ou por caminhão-tanque que recebe o combustível na beira do porto e o transporta até a usina.

A balsa-tanque se desloca por meio de um barco rebocador acoplado em uma de suas extremidades.



Figura 2-11 Balsa-tanque para transporte de combustível

Fonte: EAmE (2008)

O item 2.3.3 descreve a estrutura básica de uma usina nos Sistemas Isolados, sendo utilizada a usina de Buritis no estado do Rondônia como exemplo, por ser uma usina típica dos Sistemas Isolados e apresentar boas condições de infraestrutura.

### 2.3.3 Estrutura das Usinas nos Sistemas Isolados

A estrutura e operação das usinas termelétricas na região Norte seguem um modelo que é aplicável às mais diversas faixas de potência. Isso vale tanto para localidades como Assis Brasil, no Acre, a qual possui cerca de 6 mil habitantes ou Cruzeiro do Sul, também no Acre, com mais de 200 mil habitantes. Já em Maici, no estado de Rondônia, o fornecimento de energia beneficia 25 residências. Dentro deste contexto, as plantas a diesel movidas a MCI são projetadas para atender as demandas das localidades, mas sempre mantendo uma estrutura básica, composta por 5 áreas principais (Figura 2-12), detalhadas na sequência:

1. Casa de Recebimento de Combustível – como o próprio nome diz, é o local destinado ao recebimento de combustível, sendo que possui sistema de bombas para que o combustível possa ser bombeado para os tanques de armazenamento. Possui, também, sistema de tratamento de efluentes para captação de combustível em caso de derramamento no pátio, evitando, assim, a contaminação do solo;
2. Área de armazenamento de combustível – composta pela tancagem com capacidade suficiente de operação que garanta o fornecimento de energia de acordo com a logística de

abastecimento. Por exemplo, a usina de Parintins, no Amazonas, possui 8 tanques com capacidade total de 770.000 litros, que garante o fornecimento de energia por 15 dias sem reabastecimento;

3. Área de tratamento de combustível – local onde é instalado o sistema de centrífuga e filtro – prensa para eliminar impurezas e água do combustível antes que seja enviado aos grupos geradores;
4. Casa de máquinas – coração da usina, local onde são instalados os grupos geradores responsáveis pela geração de energia, onde geralmente são utilizados vários geradores de pequeno e médio porte ( $\leq 1MW$ ) para atender a demanda de energia. Por exemplo, a usina de Jurutí, no Pará, que possui 10.000 kW instalados, conta com 13 unidades geradoras de 800 kW;
5. Subestação – responsável por transformar os níveis de tensão da energia produzida nos geradores para níveis de distribuição para serem entregues aos consumidores, além de conter os equipamentos responsáveis pela proteção e controle do fluxo de energia elétrica produzida na usina.

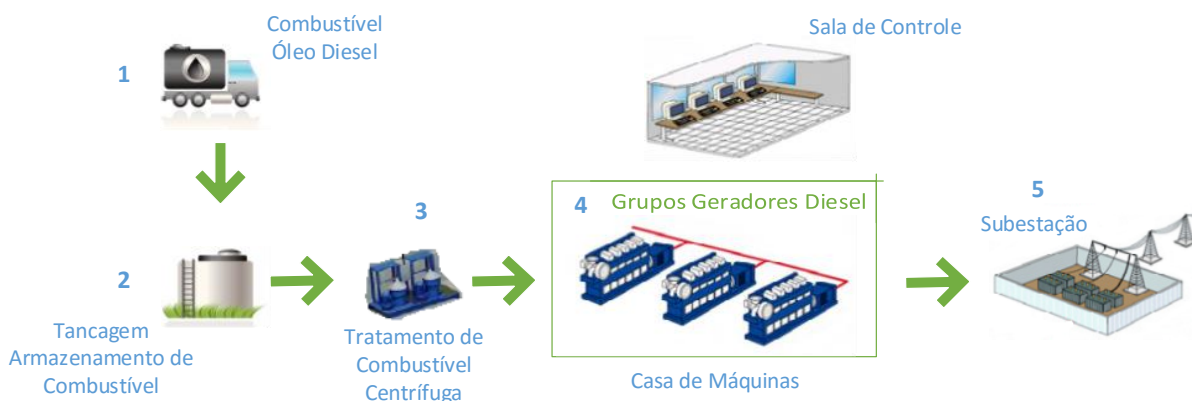


Figura 2-12 Diagrama das áreas da UTE

Fonte: Elaboração própria

Na localidade de Buritis, em Rondônia, a empresa Guascor possui uma usina termelétrica de referência nos Sistemas Isolados dentro dos princípios apresentados anteriormente. Este modelo está cada vez mais sendo usado no Brasil e no mundo. A usina de Buritis possui 17 unidades geradoras instaladas em containers no pátio da usina, com potência individual de 850 kW e potência total da usina de 14.500 kW para atender a demanda da localidade.

A instalação destas unidades geradoras em containers com isolamento acústico é uma solução prática empregada na redução do nível de ruído gerado pelos MCI como forma de adequar a usina à Norma Regulamentadora NR-15, do Ministério do Trabalho e Emprego, que regulamenta as

atividade e operações insalubres estabelecendo limites de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes para os operadores que trabalham na usina. Além de facilitar a manutenção e substituição das mesmas em relação a uma unidade geradora instalada dentro de um galpão que geralmente é de difícil acesso.

A Figura 2-13 é uma visão panorâmica da usina de Buritis indicando os setores da usina. Na sequência, é apresentado cada área da estrutura da usina de Buritis como exemplo dos setores encontrados nas usinas dos Sistemas Isolados.

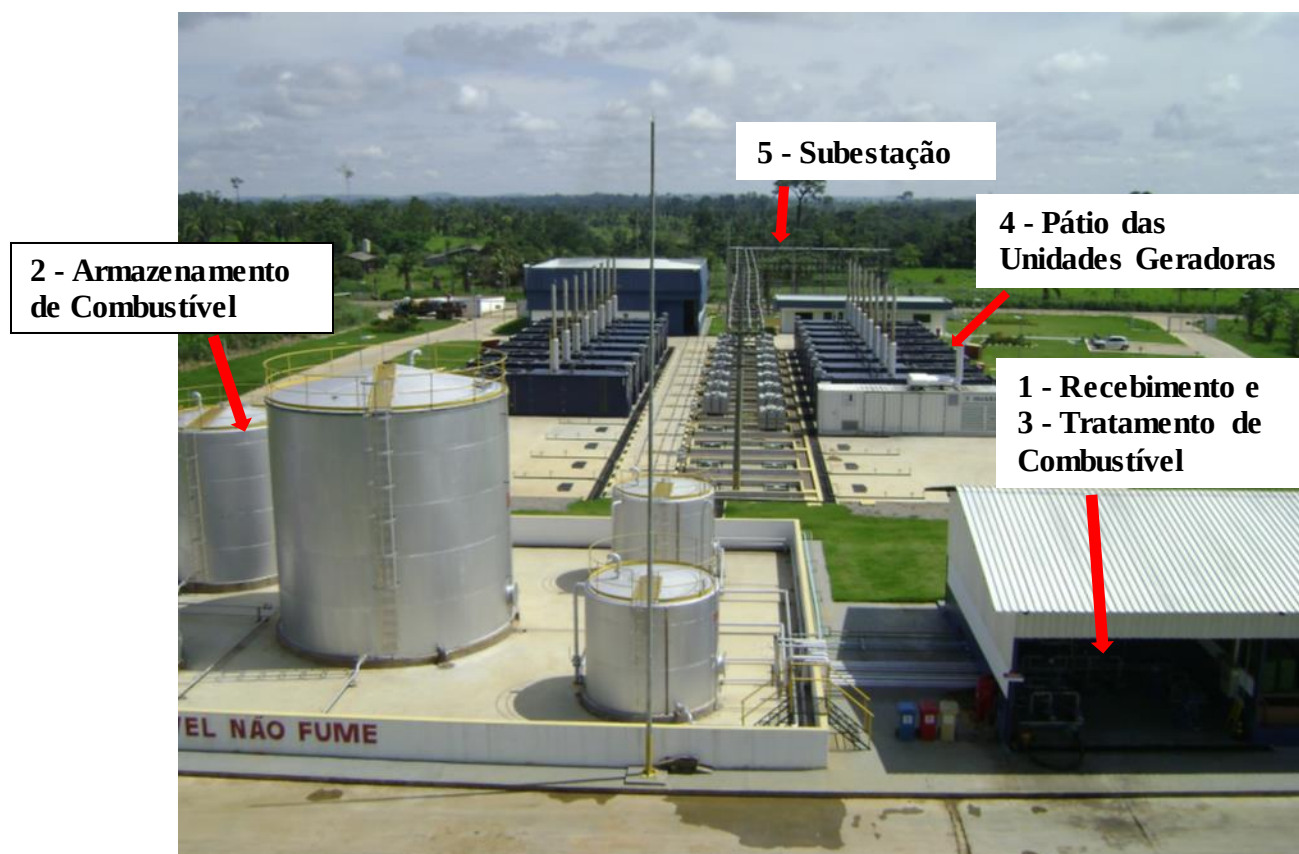


Figura 2-13 Estrutura básica de usina adotada na UTE Buritis

Fonte: EDRO (2014)

### 2.3.3.1 Área de Recebimento e Tratamento de Combustível

Na área de recebimento e tratamento de combustível possuem as bombas em redundância para que, no caso de falhas em uma das bombas, a outra possa suprir o abastecimento, uma vez que os caminhões-tanque não possuem bomba própria; já no caso da usina ser abastecida com balsa-tanque, estas possuem bombas próprias que, no caso da falta das bombas da usina, podem ser utilizadas conforme observado nas Figura 2-14 e Figura 2-15.

Além disso, a área possui centrifugas para separação de água do óleo e impurezas do combustível antes de ser enviado para a unidade geradora e fluxômetro responsáveis pela medição da quantidade de combustível recebido na usina.

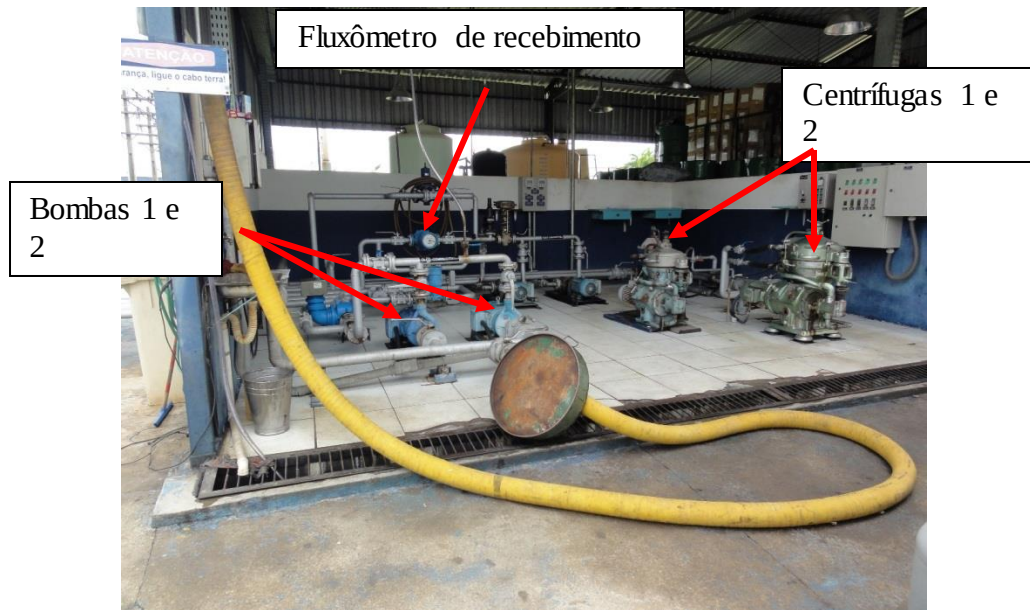


Figura 2-14 Área de Recebimento e Tratamento de Combustível (visão1)

Fonte: EDRO (2014)



Figura 2-15 Área de Recebimento e Tratamento de Combustível (visão2)

Fonte: EDRO (2014)

### 2.3.3.2 Área de Armazenamento de Combustível

Os tanques de armazenamento devem ser instalados dentro de uma bacia de contenção para que o combustível não se espalhe caso haja vazamento. Além dos tanques de armazenamento, que são os de maior volume, (Figura 2-16 e Figura 2-17) há também os tanques menores, chamados de tanques diários ou tanques de óleo tratado, onde é armazenado o combustível tratado que sai dos tanques de armazenamento e passa pelas centrífugas retirando resíduos e impurezas para que

possam assim ser utilizados nas unidades geradoras.



Figura 2-16 Tanques de armazenamento (visão 1)

Fonte: EDRO (2014)



Figura 2-17 Tanques de armazenamento (visão 2)

Fonte: EDRO (2014)

### 2.3.3.3 Casa de Máquinas ou Pátio de Máquinas

A Figura 2-19 apresenta o pátio de uma usina com grupos geradores a diesel instalados em container, para redução do nível de ruído. Esta configuração é a mais utilizada atualmente nos Sistemas Isolados e também adotada por várias empresas em todo o mundo.

A instalação dos grupos geradores em containers apresenta inúmeras vantagens em relação à instalação convencional, destacando-se:

- Facilidade na ampliação da usina, reduzindo os custos de instalação e manutenção da estrutura de casa de máquinas;

- Facilidade de acesso de caminhão e guindaste para substituição das unidades geradoras, quando necessário;
- Melhoria do sistema de arrefecimento em relação às unidades instaladas dentro de galpões, segundo os manuais de instalação dos motores do fabricante Cummins, com a instalação dos motores em containers é possível direcionar o fluxo de ar para melhorar o sistema de arrefecimento dos grupos geradores, condição que deve ser levada em conta tendo em vista que os Sistemas Isolados são localizados na região com elevada umidade e temperatura; e
- Além da importante vantagem de redução do nível de ruído para os operadores, visto que estas unidades possuem atenuação acústica nas paredes dos containers. Atualmente, o Ministério Público aplica multa às empresas que tem elevado nível de ruído por legislação ambiental que limita os níveis de ruído no entorno das usinas – no caso dos sistemas isolados é muito comum a usina possuir residências no seu entorno.



Figura 2-18 Unidades geradoras no pátio da UTE

Fonte: EDRO (2014)



Figura 2-19 Unidades geradoras e transformadores elevadores de tensão

Fonte: EDRO (2014)

Os transformadores de força da Figura 2-19 são responsáveis pela elevação do nível de tensão de geralmente 440 V para 13.800 V. Estes são interligados ao barramento da subestação.

#### 2.3.3.4 Área da Subestação

A subestação é a área da usina destinada a medir, proteger e entregar a energia elétrica produzida. O barramento central no pátio da usina, conforme pode ser observado na Figura 2-19 é responsável pela conexão das unidades geradoras em paralelo. Os religadores na subestação, conforme Figura 2-20, têm como função interromper o circuito quando ocorre um curto-circuito ou para manobras. Além disso, encontram-se também os TP (transformadores de Potencial) e os TC (transformadores de Corrente) utilizados na redução dos valores de tensão e corrente, respectivamente, para que as grandezas elétricas possam ser utilizadas pelos equipamentos de medição, efetuando assim, o registro da energia gerada para fins de faturamento, chamada de Medição de Fronteira.

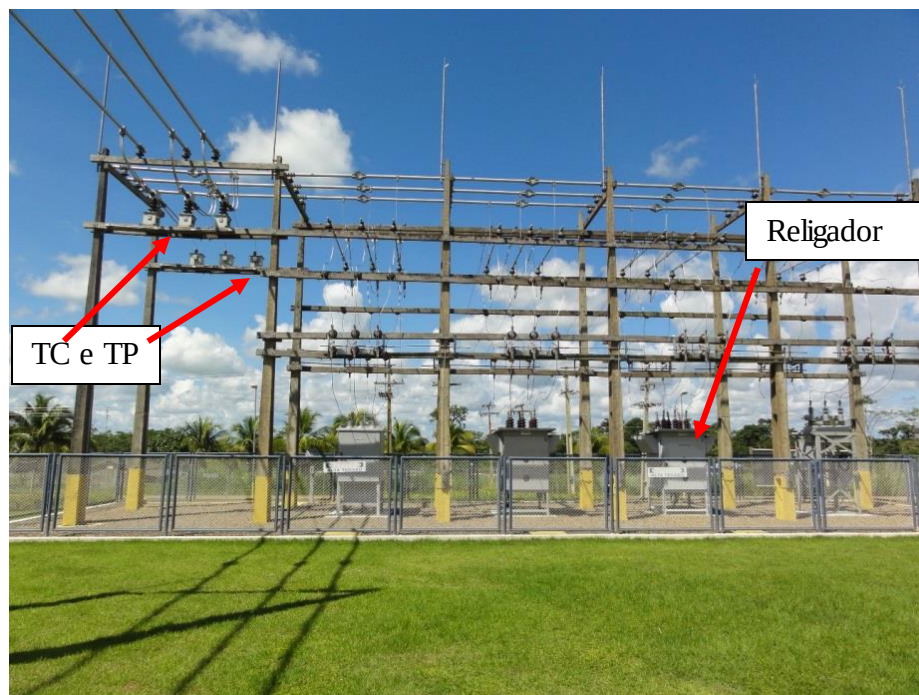


Figura 2-20 Subestação

Fonte: EDRO (2014)

#### 2.3.3.5 Considerações Sobre as Casas de Máquinas das Usinas Termelétricas nos Sistemas Isolados

A estrutura básica da casa de máquinas, encontrada nas usinas dos Sistemas Isolados Brasileiro, seguem basicamente 2 tipos de projeto:

##### a) Unidades Geradoras em Galpões (estrutura antiga)

Neste tipo de instalação, as unidades geradoras são alocadas no interior de galpões, conforme pode ser observado nas Figura 2-21 e Figura 2-22. Este modelo de instalação dificulta a substituição dos motores para uma manutenção que exija a sua retirada, como por exemplo na revisão geral (overall). Outra situação encontrada neste tipo de estrutura é o elevado nível de ruído, não apresentando bom isolamento acústico, afetando os operadores da usina e moradores do entorno.

É possível observar também, nas Figura 2-21 e Figura 2-22 que as estruturas no entorno das unidades geradoras são fixas, ou seja, não são projetadas para substituição facilitada. Nota-se que os dutos dos gases de escape são fixados na estrutura. Os cabos elétricos que saem dos geradores, ao serem desconectados das unidades geradoras, ficam expostos sem qualquer proteção, obrigando neste caso, uma intervenção maior de manutenção que aumenta o tempo de indisponibilidade e manutenção do sistema.



Figura 2-21 Casa de máquinas da UTE Triunfo em Rondônia

Fonte: EDRO (2014)



Figura 2-22 Casa de máquinas da UTE Cidade Nova em Manaus

Fonte: EDRO (2014)

#### **b) Unidades Geradoras Cabinadas ou em Container (estrutura atual)**

Este tipo de estrutura, conforme apresentado nas Figura 2-23 e Figura 2-24, facilita o transporte e a instalação dos geradores em locais de difícil acesso ou em espaços reduzidos. O uso deste tipo de instalação facilita a ampliação do parque gerador para atender o aumento da demanda sem grandes intervenções, como ocorre em galpões. Atualmente, estes são os modelos mais utilizados no Brasil, sendo também muito utilizados no mundo.

A potência média dos motores instalados em containers nos Sistemas Isolados é da ordem 700 a 1.200 kW.



Figura 2-23 UG na UTE Vista Alegre do Abunã em Rondônia

Fonte: EDRO (2014)



Figura 2-24 UG na UTE Flores em Manaus

Fonte: EAmE (2013)

A usina da Figura 2-24 possui 88 unidades geradoras de aproximadamente 1MW cada, sendo todas em containers. A Já Figura 2-25 apresenta outro exemplo de usinas termelétricas instaladas em containers, este agora instalado em Moçambique, com potência total de 110 MW.



Figura 2-25 UTE em Moçambique

Fonte: Agreeko (2015)

## 2.4 Aspectos Regulatórios

O entendimento da regulamentação aplicada na geração de energia nos ISOL é essencial para as análises da geração das usinas nestes sistemas e potencial de investimento. Os fundos setoriais Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e Conta de Consumo de Combustível (CCC) subsidiam o ISOL. Já a Resolução Normativa ANEEL nº 426 estabelece os procedimentos para planejamento, formação, processamento e gerenciamento da Conta de Consumo de Combustíveis – CCC, definindo os limites de consumo específico de combustível para as usinas, bem como o cálculo do reembolso<sup>1</sup> dos custos totais de geração.

A Figura 2-26 apresenta os principais aspectos regulatórios que serão detalhados na sequência.

---

<sup>1</sup> É o montante em R\$ apurado mensalmente referente à geração de energia nos Sistemas Isolados.



Figura 2-26 Pontos principais da Regulamentação nos Sistemas Isolados

### 2.4.1 Conta de Desenvolvimento Energético – CDE

A Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) é destinada à promoção do desenvolvimento energético dos estados, a projetos de universalização dos serviços de energia elétrica, ao programa de subvenção, que são os valores ou ajuda atribuída pelos poderes governamentais de incentivo; subsídio, patrocínio ou ajuda de custo aos consumidores de baixa renda e à expansão da malha de gás natural para o atendimento dos estados que ainda não possuem rede canalizada. Criada em 26 de abril de 2002 pela Lei nº 10.438, a CDE é gerida pela Eletrobras, cumprindo programação determinada pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

Os recursos desse fundo setorial também são utilizados para garantir a competitividade da energia produzida a partir de fontes alternativas (eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) e do carvão mineral nacional. Atualmente, cinco usinas termelétricas movidas a carvão mineral estão incluídas na CDE: Charqueadas, no Rio Grande do Sul e Jorge Lacerda, em Santa Catarina, ambas da Tractebel Energia, São Jerônimo e Presidente Médici, ambas no Rio Grande do Sul, da Eletrobras CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica), e Figueira, no Paraná, da Copel (Companhia Paranaense de Energia).

### 2.4.2 Conta de Consumo de Combustível - CCC

A Eletrobras atua, em nome do Ministério de Minas e Energia, no processo de gestão do fundo setorial da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), que é regulado e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O fundo, criado pela Lei nº 5.899/1973, tinha originalmente como finalidade ratear os custos com os combustíveis utilizados para a geração de energia elétrica nos Sistemas Interligados. Desde 1992, o mecanismo de rateio de custos com combustíveis foi estendido aos Sistemas Isolados. Por meio da Lei nº 9.648/1998, a CCC passou a considerar também os custos com os empreendimentos que promovam a economicidade atual ou futura para o fundo, conhecidos como sub-rogações, que são os benefícios concedidos àqueles projetos que reduzem o consumo de combustíveis na geração de

energia, o qual será detalhado no item 2.4.6.

A Lei nº 12.111/2009, produto da conversão da Medida Provisória nº 466/2009, novo marco legal para a CCC e para a gestão dos Sistemas Isolados, introduziu a cobertura do Custo Total de Geração (CTG), relativo ao atendimento ao serviço público de energia elétrica nos Sistemas Isolados, e manteve a cobertura para os empreendimentos sub-rogados. Posteriormente, a Lei nº 12.783/2013 introduziu ajustes no CTG e determinou que os recursos para a cobertura desses subsídios passassem a ocorrer por meio do fundo setorial da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), e não mais por arrecadação direta de quotas através da conta de energia elétrica dos consumidores residenciais e comerciais.

Portanto, a CCC não acabou após Lei nº 12.783/2013. O que acabou foi o recolhimento de quotas na conta de energia.

### **2.4.3 Histórico da Regulamentação nos Sistemas Isolados**

Para que a geração termelétrica descentralizada possa atender, com tarifas uniformizadas e compatíveis, os consumidores da região Norte, ao longo dos anos, leis e decretos foram sendo criados e atualizados para viabilizar a geração na região e ao mesmo tempo incentivar a eficiência energética, a redução do consumo de combustíveis na geração e o dispêndio dos recursos financeiros da CCC. A seguir, é apresentado, em ordem cronológica, os principais marcos regulatórios.

- **Lei nº 5.899, de 05 de Julho de 1973.**

Esta Lei criou a figura de um Grupo Coordenador para Operação Interligada dos Sistemas da Região Sudeste e Sul, sendo organizado e dirigido pela Eletrobras.

O objetivo dessa coordenação operacional foi o uso racional das instalações geradoras e de transmissão existentes e que viessem a existir, assegurando ainda, entre outras coisas, que os ônus e vantagens do consumo dos combustíveis fósseis, para atender às necessidades dos Sistemas Interligados ou por imposição de interesse nacional, sejam rateados entre todas as empresas concessionárias daqueles sistemas.

- **Decreto nº 73.102, de 07 de Novembro de 1973.**

São instituídos os Grupos Coordenadores para Operação Interligada – GCOI, com o objetivo, dentre outros, de promover a economia de combustíveis utilizados nas centrais termelétricas desses sistemas elétricos, incluindo medidas que assegurem o rateio dos ônus e vantagens do consumo de combustíveis fósseis.

Além disso, o decreto determina a criação, pela Eletrobras, de contas especiais para atender ao rateio dos ônus e vantagens do consumo de combustíveis fósseis, da Região Sudeste e da Região Sul, com a denominação de CCC-Sudeste e CCC-Sul, ou simplesmente CCC em tudo que se referir

a ambas.

- **Lei nº 8.631, de 04 de Março de 1993.**

Estende a todos os concessionários distribuidores o rateio do custo de consumo de combustíveis para geração de energia elétrica nos Sistemas Isolados.

- **Decreto nº 774, de 18 de Março de 1993.**

Determinou que o rateio do custo de consumo de combustíveis abrangerá a totalidade dos concessionários distribuidores e será feito através da Conta de Consumo de Combustíveis -CCC, a qual será desdobrada em três subcontas distintas, que se constituirão em reservas financeiras para cobertura do custo daqueles combustíveis:

- CCC-S/SE/CO – Conta de Consumo de Combustíveis destinada a cobrir os custos de combustíveis fósseis da geração termelétrica constantes do Plano de Operação do Sistema Interligado do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, tendo como contribuintes todos os concessionários que atendam a consumidores finais cujos sistemas elétricos estejam, no todo ou em parte, conectados ao Sistema Interligado;
- CCC-N/NE – Idem para os custos constantes no Plano de Operação do Sistema Interligado do Norte e Nordeste; e
- CCC-ISOL – Idem para os custos constantes no Plano de Operação dos Sistemas Isolados, tendo como contribuintes todos os concessionários do país que atendam a consumidores finais.

Além disso, o decreto determinou que as concessionárias recolhesse um tributo nas contas de energia elétrica dos consumidores e remetido à Eletrobras, a qual é a responsável por efetuar o reembolso referente à aquisição de combustíveis para geração efetuado pelas distribuidoras.

- **Lei nº 9.648, de 27 de Maio de 1998.**

Determina a manutenção temporária da CCC dos Sistemas Interligados até a sua extinção. Mantém, pelo prazo de 15 anos, a aplicação da sistemática de rateio do custo de consumo de combustíveis para geração de energia elétrica nos Sistemas Isolados, estabelecida na Lei nº 8.631, de 04 de março de 1993.

- **Decreto nº 2.655, de 02 de Julho de 1998.**

Determina que o período de transição para a extinção da CCC dos Sistemas Interligados se dará segundo regras e procedimentos do GCOI, observando os percentuais de redução a serem definidos pela ANEEL.

- **Resolução ANEEL nº 261, de 13 de Agosto de 1998.**

Além dos percentuais de redução de reembolso descritos abaixo, ao longo de três anos, determina a extinção da CCC dos Sistemas Interligados a partir de 01 de janeiro de 2006.

- no ano de 2003 – redução de 25%;
- no ano de 2004 – redução de 50%;
- no ano de 2005 – redução de 75%.

A partir de 1º de janeiro de 2006, fica extinto o benefício da sistemática de rateio de ônus e vantagens decorrentes do consumo de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica nos sistemas elétricos interligados (SIN).

- **Resolução ANEEL nº 350, de 22 de Dezembro de 1999.**

No texto inicial da Resolução aparece, além da legislação que a antecedeu, referência à competência legal da Eletrobras de gerenciamento da CCC.

Por outro lado, além de várias outras responsabilidades atribuídas à Eletrobras, são mantidas as atribuições originais de receber os recolhimentos para a CCC e de realizar reembolso com recursos da CCC, sendo que, nesta resolução, consta também que a Eletrobras deverá realizar o acompanhamento mensal do valor das três subcontas, apresentadas anteriormente no Decreto nº 774, para no caso de saldo negativo solicitar revisão das quotas de recolhimento.

- **Lei nº 10.438, de 26 de Abril de 2002.**

Estende o prazo de operação da CCC-ISOL por mais 20 (vinte) anos, a partir da publicação desta Lei. Ou seja, até 2022.

- **Lei nº 12.111, de 09 de Dezembro de 2009.**

Amplia a cobertura da CCC-ISOL, a partir de 30 de julho de 2009, em relação ao que determinava a Lei nº 9.648/98, passando a reembolsar o **custo total de geração** de energia elétrica nos Sistemas Isolados, descontado o custo médio da potência e energia comercializada no Ambiente de Contratação Regulada – ACR do Sistema Interligado Nacional.

- **Decreto nº 7.246, de 28 de Julho de 2010.**

Este Decreto regulamenta a Lei nº 12.111/09, especificamente, sobre reembolso de custos de geração nos Sistemas Isolados, trata da CCC-ISOL, onde não faz referência à Eletrobras, mas dando várias responsabilidades de regulamentação para a ANEEL. A partir deste momento, o papel da ANEEL passa a se intensificar nos Sistemas Isolados.

- **Resolução ANEEL nº 427, de 22 de Fevereiro de 2011.**

Regulamenta a Lei 12.111/09 e o Decreto 7.246/10, estabelecendo os procedimentos para planejamento, formação, processamento e gerenciamento da Conta de Consumo de Combustíveis – CCC, estabelecendo critérios mais rigorosos de eficiência para a geração nos Sistemas Isolados.

É atualmente a Resolução em vigor e será detalhada no item 2.4.5.

- **Resolução ANEEL nº 630, de 11 de Novembro de 2014.**

Esta resolução é uma alteração da Resolução nº 427/11 ANEEL, acrescentando índice de eficiência à equação de reembolso dos custos total de geração, através de um fator de corte de perdas regulatórias ( $f_c$ ), que passou a ser considerado nos reembolsos a partir de janeiro de 2015. Este índice é baseado nas perdas da distribuição de energia da concessionária informados junto à ANEEL.

Como esta dissertação é de geração de energia nos Sistemas Isolados, não foi definido no escopo deste trabalho tratar as perdas de distribuição de energia. Sendo assim, será adotado durante toda a dissertação, a hipótese de que as perdas na distribuição estão dentro do previsto nesta resolução, adotando-se, portanto,  $f_c$  igual a 1. Ou seja, sem penalização no reembolso dos custos totais de geração devido às perdas de distribuição.

#### **2.4.4 Sistema de Coleta de Dados – SCD**

Em 2005, através da REN nº 163, a ANEEL estabeleceu as condições para a implantação de sistema de monitoramento remoto de grandezas elétricas e de consumo de combustível de usinas termelétricas localizadas nos ISOL, beneficiadas pela Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis – CCC.

Buscando a modernização dos processos de gerenciamento da CCC, e em atendimento a referida resolução, a Eletrobras liderou projeto de implantação de um Sistema Digital de Coleta de Dados, composto basicamente por dois módulos: um de coleta, e outro de transmissão e consolidação dos dados.

Foi constituído um projeto de âmbito corporativo na Eletrobras, chamado SCD, para o desenvolvimento de um sistema, cuja principal função é realizar o monitoramento remoto de grandezas elétricas e de consumo de combustíveis a partir de dados coletados e armazenados em equipamentos instalados nas usinas termelétricas (Módulo de Coleta de Dados - SCD), que são transmitidos para consolidação e divulgação no site da Eletrobras (SCD Eletrobras, 2013).

A partir de 2014, através da REN nº 427, os dados mensais de geração passaram a ser obrigatoriamente informados através do SCD, sendo assim, os agentes de geração ou de distribuição com empreendimento de geração de qualquer tecnologia (hidrelétrica, termelétrica, eólica, solar etc.) ou com empreendimento de transmissão para importação de energia, localizados nos Sistemas Isolados, ficaram obrigados a implantar ou adequar, a partir de 2014, o Sistema de Coleta de Dados Operacionais (SCD), destinado a medir, registrar, armazenar e colocar à disposição os dados referentes às grandezas elétricas e ao consumo de combustíveis para fins de reembolso da CCC e reconhecimento nas tarifas de energia segundo a Resolução nº 427, (2009).

O Sistema de Coleta de Dados mede, registra e armazena, em base horária, as seguintes informações:

- Corrente (A);
- Tensão (kV);
- Potência ativa (kW);
- Energia ativa (kWh);
- Potência reativa (kVAr);
- Energia reativa (kVArh);
- Frequência (Hz); e
- Consumo de combustível (kg/h ou L/h), somente para usinas termelétricas com potência instalada acima de 1.000 kW.

Com isto, atualmente as usinas nos ISOL recebem o reembolso dos custos totais de geração apenas se tiverem o SCD, sendo crucial a manutenção dos equipamentos de medição e envio dos dados, para que a empresa possa garantir a consistência dos mesmos.

#### **2.4.5 Reembolso dos Custos de Geração ( $R_{ccc}$ )**

O agente gerador recebe pela energia gerada na usina como em qualquer empreendimento de geração, mas, no caso dos Sistemas Isolados, existe ainda o reembolso dos custos da geração nestas localidades.

Deste modo, a legislação vigente calcula o reembolso dos custos de geração de acordo com a Equação 2.1, que apesar de simples na forma de calcular, engloba várias parcelas dos custos de geração, que serão explicadas na sequência.

O reembolso dos Custos Totais de geração ( $R_{ccc}$ ) é o montante igual à diferença, apurada mensalmente, entre o custo total de geração de energia elétrica para o atendimento ao serviço público de distribuição de energia elétrica nos Sistemas Isolados e o produto da quantidade correspondente de energia elétrica pelo custo médio da potência e energia comercializadas no Ambiente de Contratação Regulada - ACR do SIN. O valor do  $ACR_{méd}$  tem vigência no ano civil subsequente ao de sua publicação, que ocorre até 30 de outubro de cada ano, por meio de Despacho da Superintendência de Regulação Econômica da ANEEL. O índice também é considerado um bom indicador do nível médio de contratação das distribuidoras. Em 2014 o valor do  $ACR_{méd}$  foi de R\$ 155,87/MWh. Já para 2015 o valor subiu 23,57% na comparação com o ano anterior atingindo R\$ 192,61/MWh (CCEE, 2014).

A parcela  $CT_{ISOL}$  engloba todos os custos de geração que são reembolsáveis os quais são detalhados no 2.4.5.1 divididos em custos com combustível, geração própria e custos de energia contratada.

O Fator de Corte de Perdas Regulatórias,  $fc$ , passou a ser considerado nos reembolsos a partir de 1 de janeiro de 2015, acrescentando um multiplicador como indicador de eficiência para as concessionárias de energia. Este índice é um estímulo adicional ao combate às perdas de energia elétrica na distribuição.

Estas perdas na distribuição não são consideradas neste trabalho, ou seja, foi considerado que as perdas na distribuição estão dentro dos limites previstos pela ANEEL na resolução nº630 sem implicar em penalizações no reembolso dos Custos Totais de Geração. Deste modo na Equação 2.1, o  $fc$  adota o valor igual a 1, não influenciando no valor final de reembolso.

A parcela  $GT_{ISOL}$  é referente à geração de energia total da usina no mês, sendo multiplicada pelo valor de referência do custo da energia no Ambiente de Contratação Regulada ( $ACR_{méd}$ ).

$$Rccc = [CT_{ISOL} - (GT_{ISOL} * ACR_{méd})] * fc \quad (2.1)$$

Onde:

RCCC: Reembolso Mensal da CCC-ISOL (R\$);  
 $CT_{ISOL}$ : Custo Mensal Total de Geração (R\$);  
 $GT_{ISOL}$ : Geração Mensal Total (MWh);  
 $ACR_{méd}$ : Custo Médio do ACR do SIN (R\$/MWh); e  
 $fc$ : Fator de Corte de Perdas Regulatórias;

Vale ressaltar que o reembolso da diferença entre custo total da energia gerada nos Sistemas Isolados e o custo da energia no Ambiente de Contratação Regulada ( $ACR_{méd}$ ) é fundamental para atrair investimentos e garantir energia nas comunidades isoladas com preços próximos dos praticados nas outras localidades do país para os consumidores.

A Equação 2.1 é expandida na Figura 2-27, onde é possível observar todos os campos que compõem a equação de reembolso dos custos de geração. Nos itens seguintes, são apresentados os detalhes de cada termo da equação.

$$Rccc = [CT_{ISOL} - (GT_{ISOL} * ACR_{méd})] * fc$$

$$CT_{ISOL} = CT_{comb} + CT_{GP} + CT_{CE}$$

$$CT_{comb} = (Q_{remb} * V_{ref}) + D \quad (2.3)$$

Figura 2-27 Esquema da Equação de reembolso expandida

Como exemplo, a Figura 2-28 apresenta os cálculos de reembolso referentes a um mês de geração de energia elétrica na usina de Jacareacanga, no Pará. Usina esta, que avaliada no estudo de caso no

#### Capítulo 4.

Ressalta-se que os custos totais de geração própria foram zerados, ou seja, não foram adicionados a depreciação de ativos (máquinas e equipamentos), bem como custos associados à contratação de manutenção e operação e alugueis de máquinas, a fim de avaliar o reembolso dos custos com combustíveis. Por exemplo, caso a usina necessite de uma unidade geradora reserva enquanto é realizado manutenção em uma de suas unidades geradoras, pode-se alugar uma unidade geradora e incluir este custo nos custos totais de geração.

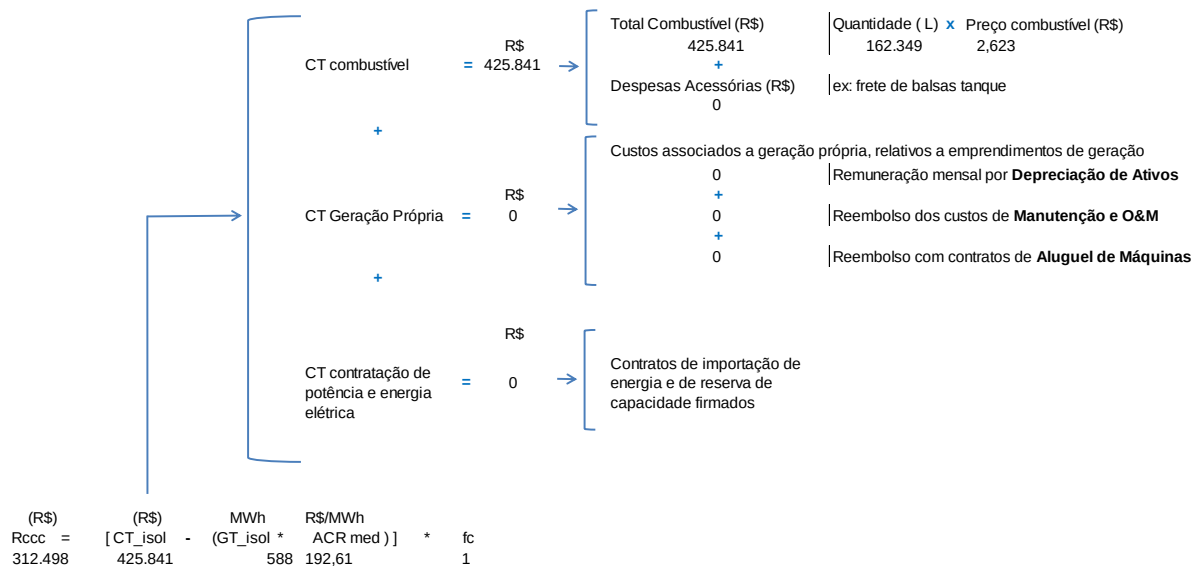


Figura 2-28 Custos totais de geração – exemplo numérico

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 2.4.5.1 Apuração dos Custos Totais de Geração ( $CT_{ISOL}$ )

A apuração do custo total de geração do agente de distribuição nos Sistemas Isolados terá periodicidade mensal e corresponderá ao somatório dos custos suportados pelo agente, composto por 3 parcelas, conforme a Equação 2.2 e detalhados cada parcela na equação nos itens 2.4.5.1.1, 2.4.5.1.2 e 2.4.5.1.3:

$$CT_{ISOL} = CT_{comb} + CT_{GP} + CT_{CE} \quad (2.2)$$

Onde:

- $CT_{ISOL}$ : Custo Total de Geração (R\$);
- $CT_{COMB}$ : Custo Total com Combustíveis (R\$);
- $CT_{GP}$ : Custo Total com Geração Própria (R\$); e
- $CT_{CE}$ : Custo Total com Contratação de Potência e Energia Elétrica (R\$).

#### 2.4.5.1.1 Custo Total com Combustíveis ( $CT_{comb}$ )

O custo total com combustíveis ( $CT_{comb}$ ) para cada agente credor de reembolso é apurado pela Eletrobras, em função do montante de energia gerado, da quantidade de combustível consumida, do preço do combustível e dos limites de consumo específico de combustível (CE) da usina. A Equação 2.3 demonstra como é calculado o combustível reembolsável ( $Q_{reemb}$ ). Caso o consumo específico mensal da usina seja menor que o limite definido (Tabela 2-3) de acordo com a capacidade de geração instalada na usina todo o combustível consumido no mês, entra na parcela do custo com combustíveis. Entretanto, caso o consumo específico mensal seja maior que o limite da (Tabela 2-3), este será limitado e, portanto, a empresa passa a ter prejuízo não contabilizando todo o combustível gasto durante a geração no mês.

A Equação 2.4 valora o total gasto de combustível utilizando a quantidade de combustível reembolsável dada pela Equação 2.3, multiplicada pelo preço de referência ( $V_{ref}$ ) do diesel da localidade apurado pela Agência Nacional do Petróleo. Somando-se a isto despesas acessórias (D), tais como, frete adicional com balsa-tanque ou tratores para puxar caminhão-tanque em regiões de difícil acesso ao custo total com combustível.

$$Q_{reemb} = Q_{verificado} * \frac{CE_{ANEEL}}{CE_{verificado}}; \text{ para } CE_{verificado} \geq CE_{ANEEL}; \text{ ou} \quad (2.3)$$

$$Q_{reemb} = Q_{verificado}; \text{ para } CE_{verificado} < CE_{ANEEL}$$

$$CT_{comb} = (Q_{reemb} * V_{ref}) + D \quad (2.4)$$

Onde:

|                     |                                                                        |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $CT_{comb}$ :       | Custo Total de Combustível (R\$);                                      |
| $Q_{reemb}$ :       | Quantidade de combustível reembolsado (L);                             |
| $V_{ref}$ :         | Valor de Referência do diesel na localidade (R\$);                     |
| D:                  | Despesas acessórias no custo do combustível (R\$) ex: frete de balsas; |
| $CE_{ANEEL}$ :      | Consumo Específico limite admitido pela ANEEL (L/kWh); e               |
| $CE_{verificado}$ : | Consumo Específico verificado no mês na usina (L/kWh).                 |

Os limites da Tabela 2-3, representam valores máximos de consumo específico de combustíveis por usina mensalmente, prevalecendo, para cada usina, o menor valor entre o estabelecido em contrato (para empreendimento de geração contratado por agente de distribuição) e o valor médio verificado no ano civil anterior com tolerância de 5% (cinco por cento), caso sejam inferiores ao respectivo limite da tabela Tabela 2-3 (REN Nº 427 ANEEL, 2011).

Tabela 2-3 – Limites de Consumo Específico mensal definido pela ANELL por Potência Instalada nas usinas baseadas em MCI

| Potência (kW) |        | Limite de Consumo  |
|---------------|--------|--------------------|
| de            | a      | Específico (L/kWh) |
| 1             | 100    | 0,404              |
| 101           | 250    | 0,349              |
| 251           | 500    | 0,329              |
| 501           | 750    | 0,296              |
| 751           | 1.000  | 0,289              |
| 1.001         | 2.500  | 0,289              |
| 2.501         | 5.000  | 0,283              |
| 5.001         | 7.500  | 0,283              |
| 7.501         | 10.000 | 0,283              |
| 10.001        | 12.500 | 0,253              |
| 12.501        | 15.000 | 0,253              |
| 15.001        | 20.000 | 0,253              |
| 20.001        | acima  | 0,210              |

Fonte: Anexo da Resolução Normativa nº 427 ANEEL

Os limites de consumo específico estão cada vez mais restritivos ao longo dos últimos anos, incentivando com isto a eficiência e o uso de fontes alternativas que substituam total, ou parcialmente o consumo de diesel nas usinas termelétricas.

No capítulo 3 é apresentada uma análise dos limites de consumo específico de acordo com as informações dos fabricantes de motores e a evolução dos limites estabelecidos pela a ANEEL ao longo dos últimos anos.

Os preços dos combustíveis são informados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e referem-se aos preços praticados nos postos de combustível da localidade. Caso não se possua valor de referência para a localidade, será adotado o valor da localidade mais próxima que possua valor de referência de combustível.

O preço médio de referência do diesel nos Sistemas Isolados é 2,623 R\$/L (em maio de 2015), as Tabela 2-4 e Tabela 2-5 apresentam os preços do diesel, conforme informado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Tabela 2-4 Preço médio de referência do diesel nas regiões

| MUNICÍPIO           | Nº DE POSTOS Pesquisados | Consumidor  |               |              |              | Distribuidoras |              |               |              |              |
|---------------------|--------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
|                     |                          | PREÇO MÉDIO | DESVIO PADRÃO | PREÇO MÍNIMO | PREÇO MÁXIMO | MARGEM MÉDIA   | PREÇO MÉDIO  | DESVIO PADRÃO | PREÇO MÍNIMO | PREÇO MÁXIMO |
| <b>Centro Oeste</b> | 476                      | 2,966       | 0,144         | 2,639        | 3,339        | 0,325          | 2,641        | 0,094         | 2,469        | 2,830        |
| <b>Nordeste</b>     | 1009                     | 2,768       | 0,101         | 2,419        | 3,249        | 0,291          | 2,477        | 0,069         | 2,350        | 2,680        |
| <b>Norte</b>        | 429                      | 3,018       | 0,187         | 2,720        | 3,700        | 0,395          | <b>2,623</b> | 0,105         | 2,410        | 3,056        |
| <b>Sudeste</b>      | 2651                     | 2,758       | 0,103         | 2,450        | 3,297        | 0,314          | 2,444        | 0,077         | 2,111        | 2,670        |
| <b>Sul</b>          | 938                      | 2,748       | 0,098         | 2,460        | 3,198        | 0,342          | 2,406        | 0,064         | 2,258        | 2,583        |

Período : De 10/05/2015 a 16/05/2015

Fonte: Agência Nacional do Petróleo (2015)

Tabela 2-5 Preço médio de referência do diesel nos estados da região norte

| MUNICÍPIO           | Nº DE POSTOS Pesquisados | Consumidor  |               |              |              | Distribuidoras |             |               |              |              |
|---------------------|--------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|----------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
|                     |                          | PREÇO MÉDIO | DESVIO PADRÃO | PREÇO MÍNIMO | PREÇO MÁXIMO | MARGEM MÉDIA   | PREÇO MÉDIO | DESVIO PADRÃO | PREÇO MÍNIMO | PREÇO MÁXIMO |
| <b>Amapá</b>        | 27                       | 2,930       | 0,135         | 2,800        | 3,250        | 0,292          | 2,638       | 0,040         | 2,596        | 2,676        |
| <b>Rondonia</b>     | 90                       | 3,089       | 0,074         | 2,959        | 3,290        | 0,443          | 2,646       | 0,023         | 2,620        | 2,676        |
| <b>Amazonas</b>     | 73                       | 2,983       | 0,171         | 2,830        | 3,400        | 0,355          | 2,628       | 0,056         | 2,410        | 2,735        |
| <b>Acre</b>         | 50                       | 3,365       | 0,143         | 3,260        | 3,700        | 0,489          | 2,876       | 0,083         | 2,712        | 3,056        |
| <b>Para</b>         | 108                      | 3,031       | 0,126         | 2,839        | 3,400        | 0,407          | 2,624       | 0,058         | 2,534        | 2,700        |
| <b>Roraima</b>      | 29                       | 3,094       | 0,051         | 3,020        | 3,210        | 0,437          | 2,657       | 0,070         | 2,591        | 2,832        |
| <b>Mato Grosso*</b> | 95                       | 3,056       | 0,114         | 2,879        | 3,339        | 0,334          | 2,722       | 0,092         | 2,512        | 2,820        |

Período : De 10/05/2015 a 16/05/2015

Fonte: Agência Nacional do Petróleo (2015)

#### 2.4.5.1.2 Custo Total com Geração Própria ( $CT_{GP}$ )

O custo total com geração própria ( $CT_{GP}$ ) é apurado pela Eletrobras, excluído qualquer custo associado à compra e venda de combustíveis, observados os custos homologados pela ANEEL. Os custos associados à geração própria, relativa a empreendimento em operação comercial, são definidos com base nas informações constantes dos processos de revisão tarifária de cada agente de distribuição dos Sistemas Isolados e nos valores de referência definidos no anexo da resolução ANEEL °427, replicados na Tabela 2-6, observado que:

- A geração própria associada a ativos próprios será valorada pela soma da parcela referente à depreciação e remuneração dos ativos, obtida dos dados da última revisão tarifária, e parcela de Operação e Manutenção definida, observados o porte e a tecnologia de geração; e
- Para o caso de aluguel de máquinas, o custo de geração será limitado ao valor total de referência definido no Apêndice A, observado o porte e a tecnologia de geração.

Tabela 2-6 Referência para o custo de geração de usina termelétrica a diesel nos Sistemas Isolados

| Potência Instalada<br>(kW)               |               | Custo de O&M<br>(R\$/MW.h) | Receita Fixa<br>(R\$/MW.h) | Total<br>(R\$/MW.h) |
|------------------------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| <i>de</i>                                | <i>a</i>      |                            |                            |                     |
| Motor de Combustão Interna (óleo diesel) |               |                            |                            |                     |
| <i>Até</i>                               | <i>24</i>     | 106,60                     | 165,59                     | 272,19              |
| <i>25</i>                                | <i>49</i>     | 106,60                     | 165,59                     | 272,19              |
| <i>50</i>                                | <i>74</i>     | 106,60                     | 165,59                     | 272,19              |
| <i>75</i>                                | <i>99</i>     | 106,60                     | 165,59                     | 272,19              |
| <i>100</i>                               | <i>249</i>    | 107,99                     | 147,80                     | 255,79              |
| <i>250</i>                               | <i>499</i>    | 107,99                     | 135,21                     | 243,19              |
| <i>500</i>                               | <i>749</i>    | 107,99                     | 122,05                     | 230,03              |
| <i>750</i>                               | <i>999</i>    | 90,88                      | 102,71                     | 193,58              |
| <i>1.000</i>                             | <i>2.499</i>  | 90,88                      | 104,27                     | 195,14              |
| <i>2.500</i>                             | <i>4.999</i>  | 85,74                      | 103,99                     | 189,73              |
| <i>5.000</i>                             | <i>7.499</i>  | 76,27                      | 92,50                      | 168,77              |
| <i>7.500</i>                             | <i>9.999</i>  | 71,12                      | 86,26                      | 157,38              |
| <i>10.000</i>                            | <i>14.999</i> | 66,73                      | 80,95                      | 147,68              |
| <i>15.000</i>                            | <i>19.999</i> | 58,37                      | 70,80                      | 129,16              |
| <i>20.000</i>                            | <i>Acima</i>  | 53,39                      | 64,76                      | 118,14              |

Fonte: Adaptado de Resolução Normativa nº 427 ANEEL (2011)

#### 2.4.5.1.3 Custo Total com Contratação de Potência e Energia Elétrica (CT<sub>CE</sub>)

Existem casos em que o agente gerador necessita comprar energia para distribuir, a fim de garantir o fornecimento de energia; para estes casos, os custos podem ser incluídos no Custo Total de Combustível através da parcela Custo Total com Contratação de Potência e Energia Elétrica (CT<sub>CE</sub>).

O CT<sub>CE</sub> é informado mensalmente pelo agente de distribuição nos Sistemas Isolados à Eletrobras, inclusive os contratos de importação de energia e de reserva de capacidade firmados.

Os custos de geração própria são atualizados pelo IPCA no mês do reajuste tarifário da concessionária de distribuição.

#### **2.4.6 A Sub-rogação à Conta de Consumo de Combustível**

A sub-rogação junto à CCC é um sistema de subsídio para projetos que visam substituir total ou parcialmente o consumo de combustíveis fósseis dos empreendimentos beneficiados pelo rateio da CCC, ou seja, aos empreendimentos que recebem o reembolso dos custos totais de geração nas usinas termelétricas dos Sistemas Isolados.

Apesar do sistema de subsídio dos custos da geração das usinas termelétricas dos Sistemas Isolados garantir o preço uniforme e compatível com os preços praticados no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) do Sistema Interligado, este subsídio por si só não é atrativo para que os agentes geradores invistam em outras fontes de energia diferentes da tecnologia baseada em Motores de Combustão Interna.

A sub-rogação, como normalmente é chamada, reembolsa até 75% do valor do investimento do projeto básico aprovado pela ANEEL (REN Nº 427 ANEEL, 2011).

Segundo a ANEEL, poderão se sub-rogar dos benefícios da CCC-ISOL os empreendimentos abaixo listados que venham reduzir o dispêndio com a CCC de combustíveis fósseis:

1. Aproveitamentos hidrelétricos de potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinados à produção independente ou autoprodução de energia elétrica, mantidas as características de pequena central hidrelétrica;
2. Empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, solar, biomassa ou gás natural e o respectivo sistema de transmissão e/ou distribuição associado;
3. Empreendimentos de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica; e
4. Outros empreendimentos, tais como sistemas de transporte e distribuição de gás natural, na proporção de sua utilização para geração de energia elétrica, e projeto de eficientização de central termelétrica ou de troca de combustível, desde que represente redução do dispêndio da CCC.

Caso ocorra a interligação da usina ao Sistema Interligado, ficará garantido o direito de sub-rogação dos benefícios do rateio da CCC até que seja efetivado todo o reembolso restante. Isto se faz importante pois garante o retorno do investimento ao investidor.

Após o ato de outorga dos empreendimentos, a ANEEL explicitará a concessão do benefício. Fica acordado que o reembolso do projeto se dará a partir do empreendimento em operação, ou seja, a autorização garante que o agente gerador receberá até 75% do investimento se o mesmo estiver em operação e com comprovada redução total ou parcial dos combustíveis fósseis.

Em até 180 dias após a entrada em operação comercial do empreendimento, o agente gerador deverá encaminhar à ANEEL toda a documentação necessária à comprovação dos custos realizados, acompanhada de relatório de conformidade de auditoria independente, sob pena de

interrupção do pagamento do benefício.

Após a entrada em operação e de posse da documentação mencionada no parágrafo anterior, a ANEEL, por meio de fiscalização específica, realizará auditoria confrontando o orçamento apresentado com o realizado, bem como o projeto aprovado com o implantado.

O valor do benefício a ser pago mensalmente da sub-rogação é dado pela Equação 2.5 de acordo com o seguinte critério:

A parcela  $V_i$  será o valor apurado que o empreendimento receberá por reduzir o consumo de diesel, com uma fonte alternativa como por exemplo a recuperação do calor dos gases de exaustão dos MCI.

$$V_i = G_{\text{Realizada}} * (CT_{\text{Termelétrica}} - CG_{\text{Empreendimento}}) \quad (2.5)$$

Onde:

$V_i$ : Valor do benefício a ser recebido no mês  $i$  (R\$);  
 $G_{\text{Realizada}}$ : Energia gerada pelo empreendimento (MW.h);  
 $CT_{\text{Termelétrica}}$ : Custo total da energia termelétrica substituída (R\$/MW.h); e  
 $CG_{\text{Empreendimento}}$ : Custo total de geração do empreendimento que reduziu o dispêndio da CCC (R\$/MW.h).

Deste modo, dos 75% do total do custo de implantação do empreendimento será deduzido mensalmente o valor da parcela  $V_i$ , devendo ser realizado o pagamento de tantas parcelas quantas forem necessárias para que seja atendido o montante total estabelecido, em Reais, do projeto que substituiu total ou parcialmente o consumo de diesel.

Vale ressaltar que, na ocorrência de indisponibilidade da geração por período igual ou superior a quinze dias, independentemente do motivo que a tenha provocado, acarretará a suspensão do pagamento das parcelas seguintes até que a instalação objeto da sub-rogação volte a operar.

Por exemplo, somente com efficientização da usina termelétrica de Óbidos no Pará em 2014, que é uma usina que possui 7.520 kW de potência instalada distribuída em 9 unidades geradoras de 836 kW, foi autorizado o projeto de 746.647,52 em 2014. Este projeto teve o reembolso total deste valor em apenas 6 meses, dado o valor da redução de combustível com a revisão geral das unidades geradoras, reduzindo o consumo de combustível dos motores que já apresentavam degradação.

## **2.5 Motor de Combustão Interna (MCI) a Diesel**

Os motores de combustão interna são uma tecnologia madura e seu princípio de funcionamento é amplamente difundido no meio acadêmico. Entretanto, vale ressaltar algumas características do seu regime de operação e eficiência que serão abordados na sequência.

### **2.5.1 Tipos de Regime de Operação (Emergência e Contínuo)**

Os MCI, em geral, são classificados pelos fabricantes de 2 formas de acordo com o tipo de operação eventual e contínuo. As folhas de dados informam qual a máxima potência sob a qual o motor pode operar de acordo com o regime de operação, para não degradar o equipamento prematuramente, o que pode acarretar redução do intervalo entre revisões e/ou manutenções corretivas (SCANIA, 2014).

#### **2.5.1.1 Emergência (Stand-by Power)**

É a classificação dada para os motores que operam, como o próprio nome indica, em regime de Emergência, atendendo cargas contínuas ou variáveis. Neste regime de trabalho não é permitido sobrecarga. O gerador de emergência é uma reserva da fonte de energia principal (concessionária de energia) e espera-se que o mesmo não seja utilizado com frequência, de modo que a potência máxima informada na classificação emergência definida é a mais alta potência para que o motor foi projetado.

#### **2.5.1.2 Contínuo (Prime Power)**

Classificação da potência do motor para trabalho contínuo, sem interrupção, atendendo cargas constantes e variáveis. Neste regime de operação, a potência é um pouco menor que a potência definida para emergência para evitar sobreaquecimento e desgaste prematuro, porém, existe a possibilidade de sobrecarga de 10% durante 1 hora a cada 12 horas de funcionamento, em geral. Além de não haver limite de horas de trabalho, obedecendo sempre as paradas programadas para manutenção.

Deste modo, a potência definida dos grupos geradores nos Sistemas Isolados é a contínua.

Ressalta-se, ainda, que independente do regime de operação, a potência nominal é o nome dado à máxima potência para a qual o motor foi projetado para o regime de operação, seja o regime de operação Emergência ou Contínuo, conforme exemplo apresentado na Tabela 2-7.

Tabela 2-7 Regime de operação motor Cummins QSX15-G9

| Potência<br>Nominal | Emergência<br>500 kW | Contínuo<br>455 kW |
|---------------------|----------------------|--------------------|
|---------------------|----------------------|--------------------|

Fonte: Adaptado de Cummins (2015)

### 2.5.2 Influência das Condições Ambientais na Operação dos MCI

O desempenho dos MCI é afetado pelas condições do ar atmosférico devido à variação da massa de ar que entra nos cilindros dos motores, pois massa específica do ar é influenciada pela altitude, temperatura e umidade.

As declarações de potência, bem como do consumo de combustível dos MCI, são padronizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR ISO 3046/1. Ambas seguem uma padronização de especificação e das condições de operação da bancada de ensaio do fabricante e ajustadas às condições-padrão de referência. Para os MCI, as condições ISO são:

- Pressão atmosférica de 100 kPa (1 bar);
- Temperatura ambiente de 25°C (77°F); e
- Umidade relativa (UR) de 30%;

A pressão atmosférica está relacionada à altitude em relação ao nível do mar. Uma vez que a altitude é um parâmetro mais disponível, é geralmente utilizada como referência na literatura técnica. A pressão de 100 kPa corresponde à altitude de 110 metros.

A degradação da performance dos MCI a diesel é referenciada às condições ISO. Na maior parte das aplicações (projeto ou operação) é prevista uma queda de desempenho destes equipamentos na condição ambiente local. A degradação é geralmente especificada como fatores de correção da potência e do *heat rate* e é comumente chamada pelos fabricantes de *derating factors*.

Vale destacar que geralmente os fatores de redução são informados para a potência bruta do motor.

Ao considerar a potência de saída do gerador deve ser considerada a eficiência do alternador.

Igualmente, a degradação do desempenho dos grupos geradores é determinada pelo projeto do conjunto de equipamentos. Assim, os fatores de correção variam de acordo com os fabricantes como também entre modelos. Os grupos geradores são tipicamente projetados para operar com máximo desempenho próximo do nível do mar dentro das condições padrão de temperatura e pressão.

O fabricante Caterpillar afirma que a classificação do motor de combustão interna diesel é determinada principalmente por limites estruturais e térmicos. Estes limites incluem a pressão máxima do cilindro durante a combustão, velocidade do turbocompressor, temperaturas dos gases

de escape e o tipo de combustível. Nestas condições de projeto, em que o motor é posto a operar nos supracitados limites, serão determinadas a altitude máxima e a temperatura ambiente para uma específica classificação. Quando o motor opera em um local que excede a altitude ou a temperatura ambiente permissível, deve-se ter uma redução de capacidade. (CATERPILLAR, 2010).

#### **2.5.2.1 Influência da Temperatura**

Quando o MCI está operando em ambientes com elevada temperatura, o motor sofre uma perda de potência porque o ar quente é menos denso que o ar frio. Desta forma, temperaturas elevadas fazem com que menos massa de ar seja admitida no mesmo volume.

Os motores, em geral, possuem redução leve (desprezível) do desempenho para temperaturas até 40°C (104°F). Acima desta temperatura, deverá ser aplicada um fator de degradação de 2% para cada 11°C, ou 1% para cada 10°F (CUMMINS, 2014).

#### **2.5.2.2 Influência da Pressão Atmosférica**

A influência da pressão atmosférica não é considerada até altitudes que variam de 400 a 1700 metros, de acordo com o projeto. Até a altitude declarada pelo fabricante está garantida a especificação de potência, não sendo aplicados fatores de degradação. Onan (1974) afirma que o grau das perdas de potência varia de motor para motor, mas como regra geral, reduz cerca de 4% para cada 1000 pés (aproximadamente 305 metros) de elevação da altitude.

De um modo geral com o aumento da altitude, a massa específica do ar é reduzida (similar ao que ocorre com a elevação da temperatura ambiente), o que causa a redução da potência do motor e menor capacidade de refrigeração. O efeito da redução da pressão atmosférica com a elevação da altitude é constatado no enchimento dos cilindros, reduzindo a potência disponível.

#### **2.5.2.3 Influência da Umidade**

A literatura técnica não especifica fatores de degradação para o aumento da umidade acima da condição ISO. A influência da umidade é apenas reportada na partida (*start up*) dos motores e está associada ao processo de ignição. O baixo nível de oxigênio prejudica a ignição, uma vez que o oxigênio é o elemento do ar que ativa a ignição nos motores para a queima do combustível.

A Comercializadora Brasileira de Energia Emergencial (CBEE), ao realizar testes de consumo específico na UTE São José, localizada em Manaus-AM, afirmou que a umidade relativa do ar se torna sem efeito por serem MCI equipados com turboalimentadores. (CBEE, 2005).

### 2.5.2.4 Considerações Gerais

Como exemplo da influência da temperatura e altitude, são apresentadas, na Figura 2-29, as curvas dos fatores de degradação em relação à potência nominal especificada, definidas para o motor modelo QSK23-G3 de fabricação Cummins, de potência nominal igual a 809 kWm a 1.800 RPM.

Nesta figura, estão associadas a três diferentes valores de temperatura ambiente, 25°C, 40°C e 50°C. Verifica-se que, à medida que a temperatura aumenta, as curvas se deslocam para cima. Qualitativamente, este deslocamento representa um pior desempenho devido ao aumento do fator de degradação. A curva inferior representa a condição ISO de temperatura ambiente (25°C). Para esta condição, a influência da altitude é verificada para valores acima de 4.500 pés, aproximadamente (1.370 metros). Para a operação em uma condição mais extrema, com temperatura ambiente de 50°C, a correção da potência do motor deve ocorrer para altitudes acima de aproximadamente 1000 pés (300 metros).

Para a operação em condições ambientais além daquelas informadas na Figura 2-29, ocorre uma degradação adicional de 5% para cada 300 metros (1.000 pés) e de 7% para cada 10°C (18°F). (CUMMINS, 2014).

Vale destacar que os fabricantes não especificam correções para o consumo específico de combustível e que esta informação não é obrigatória conforme a norma NBR ISO 3046/1 de 1995.

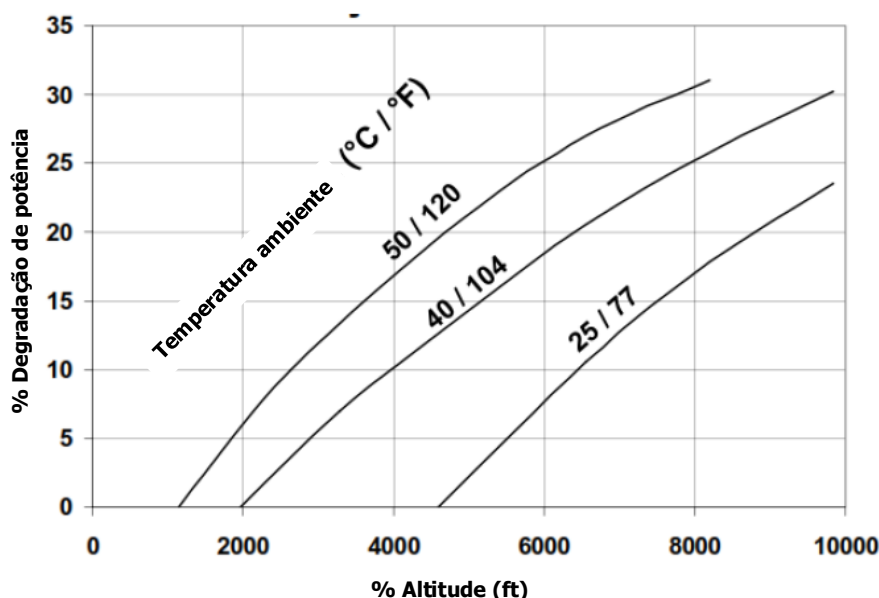


Figura 2-29 Curvas de degradação de potência motor QSK23-G3

Fonte: Cummins, 2014

A Tabela 2-8 apresenta os dados para o cálculo dos fatores de degradação de grupos geradores tipicamente utilizados nas usinas termelétricas localizadas no interior do Amazonas.

Os fatores são apresentados em relação às condições de referência ISO e condições de projeto e foram obtidos de catálogos e folhetos disponibilizados pelos fabricantes.

Tabela 2-8 Exemplo de fatores de degradação de MCI

| Grupo Gerador (GG) |                      |                            | Fatores de degradação da potência           |                                                |         |
|--------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|
| Fabricante Motor   | Modelo Motor         | Potência Nominal GG (kW)   | Temperatura                                 | Altitude                                       | Umidade |
| Cummins            | KTA19-G2             | 350 (Prime)                | Acima de 40°C, redução de 2% para cada 11°C | Acima de 1678 m, redução de 4% para cada 305 m | --      |
| Cummins            | QST30-G2<br>QST30-G1 | 736 (Prime)<br>680 (Prime) | Acima de 40°C, redução de 2% para cada 11°C | Acima de 1524 m, redução de 4% para cada 300 m | --      |
| Cummins            | NTA855-G2            | 270 (Prime)                | Acima de 40°C, redução de 2% para cada 11°C | Acima de 1769 m, redução de 4% para cada 305 m | --      |
| Detroit Diesel/MTU | T123-8A36            | 1400 (Prime)               | Acima de 40°C, redução de 2% para cada 5°C  | Acima de 400 m, redução de 1% para cada 100 m  | --      |
| Detroit Diesel/MTU | R123-7M36            | 680 (Prime)                | Acima de 40°C, redução de 3% para cada 5°C  | Acima de 400 m, redução de 1% para cada 100 m  | --      |

Fonte: Oliveira, 2014

Com base nos fatores de degradação, pode-se afirmar que somente em condições extremas, acima de 40°C e altitudes elevadas, ocorre a redução da potência nominal dos equipamentos. Os grupos geradores relacionados na Tabela 2-8 são turboalimentados e apresentam influência desprezível quanto à umidade. No entanto, grupos geradores de pequeno porte, com potência nominal abaixo de 50 kW possuem aspiração natural (não turboalimentados), existindo um fator de redução da potência em função do aumento da umidade. Como exemplo, o grupo gerador de fabricação Cummins, motor modelo 4B3.3-G1, de potência nominal em regime de operação contínua e de 30 kW, apresenta redução de 4% para cada 305 metros (1.000 pés) acima de 247 metros (810 pés), 1% para cada 5,6°C (10°F) acima de 29,4°C (85°F), e 1,5% para cada 10% de umidade relativa acima de 30%.

### 2.5.3 Consumo Específico de Combustível

O consumo específico de uma unidade geradora é, por definição, a quantidade de combustível consumido para gerar uma unidade de energia elétrica. As Equações 2.6 e 2.7 representam esta definição e apresentam as unidades frequentemente adotadas.

O conceito de consumo específico é uma das formas de avaliação do desempenho de motores de combustão interna.

$$CE(L/ kWh) = \frac{\Delta V}{\Delta E} \quad (2.6)$$

$$CE(kg / kWh \text{ ou } ton / MWh) = \frac{\Delta m}{\Delta E} \quad (2.7)$$

Onde:

$\Delta V$ : Volume num determinado intervalo de tempo ( $\Delta T$ ) ou a quantidade do combustível consumido, em Litros;

$\Delta m$  Massa do combustível consumido para um determinado intervalo de tempo ( $\Delta T$ ), em kg ou tonelada;

$\Delta E$ : Energia elétrica gerada no mesmo intervalo de tempo ( $\Delta T$ ), em kWh.

A ANEEL, ao definir os limites de consumo específico conforme apresentado anteriormente na Tabela 2-3, utiliza a Equação 2.6 para motores que operam com diesel e a Equação 2.7 para motores que utilizam óleo combustível.

Os valores de consumo específico (Figura 2-30) são geralmente fornecidos em catálogos e folhetos dos fabricantes e fornecedores dos equipamentos, sendo determinados por meio de testes realizados em condições controladas estabelecidas pela norma internacional ISO 3046. As curvas ISO para os MCI que operam nos Sistemas Isolados serão detalhadas no item 3.4.

As informações de consumo específico são usualmente fornecidas para o funcionamento do motor a carga plena, como também podem ser apresentadas em cargas parciais de 75%, 50% e 25% da potência nominal.

Utilizando-se estas informações, é possível obter a curva característica de consumo específico do equipamento, a qual é intrínseca a este e depende de cada projeto em particular, modelo e fabricante.

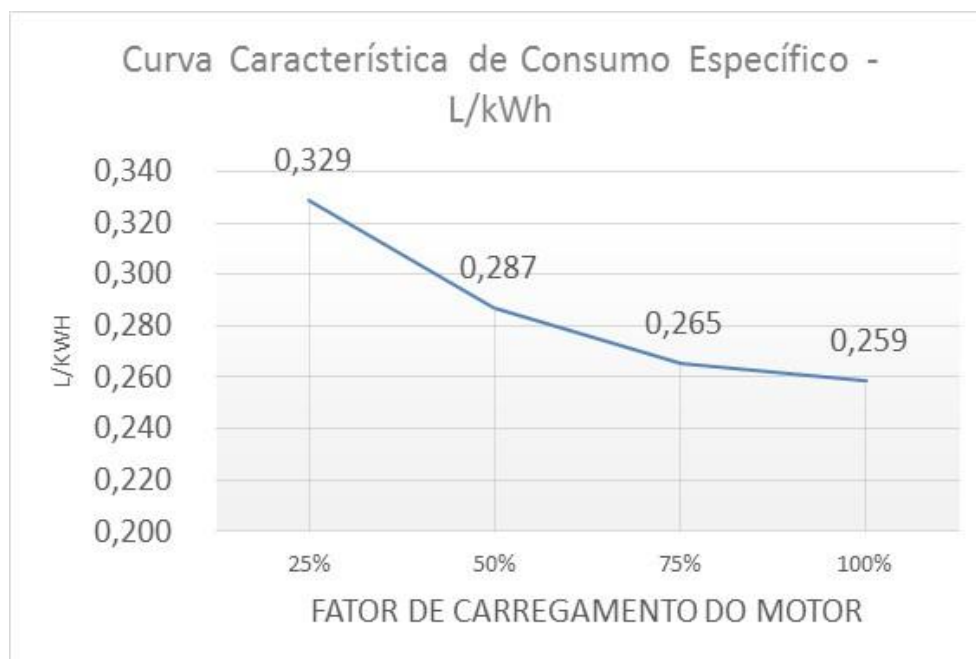


Figura 2-30 Curva característica de consumo específico de combustível - Grupo gerador Cummins QSX15- G9

Fonte: Cummins (2014)

As curvas de CE de motores de combustão interna possuem, em geral, trajetórias descendentes. Valores elevados de CE são observados para fatores de carga (FC) ou carregamento inferiores a 30%. Valores mais baixos são obtidos com fatores de carga entre 75 a 100%, faixa na qual é obtido o FC ótimo para operação, dependendo de cada tecnologia, fabricante e modelo de unidade geradora.

Assim, é recomendável que o despacho das unidades geradoras ocorra com fator de carregamento preferencial acima de 75% para que o consumo de combustível da unidade geradora e, conseqüentemente, da usina seja minimizado, aumentando sua eficiência.

## 2.6 Ciclo Orgânico de Rankine - ORC

O Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) (*Organic Rankine Cycle* – ORC) é um equipamento que opera num ciclo termodinâmico já em estágio comercial que converte a energia térmica de baixa e média temperatura em energia elétrica. O processo de funcionamento do ORC é semelhante ao do ciclo de Rankine convencional, envolvendo os mesmos componentes (evaporador, turbina a vapor, condensador e bomba). Entretanto, utiliza fluido orgânico ao invés de água como fluido de trabalho.

O princípio de funcionamento do ORC é o mesmo do ciclo de Rankine: idealmente, o fluido é bombeado isentropicamente para um evaporador que recebe calor da fonte quente (no caso, gases de exaustão dos MCI), onde é evaporado à pressão constante. Em seguida, é expandido isentropicamente numa turbina, produzindo trabalho, sendo finalmente condensado à baixa pressão, completando o ciclo (Figura 2-31). Segundo Vaja e Gabarotta (2010), o ciclo ORC combinado com MCI incrementa a eficiência global do sistema em aproximadamente 12%, ressaltando que o ciclo ORC só recupera parte do calor liberado pelo motor através dos gases de escape e água de refrigeração.

O aproveitamento da energia desperdiçada nos MCI acontece principalmente através dos gases de exaustão e através da água de refrigeração. O reaproveitamento dos gases de exaustão é o método utilizado neste trabalho, com a temperatura dos gases de escape em torno de 450°C.

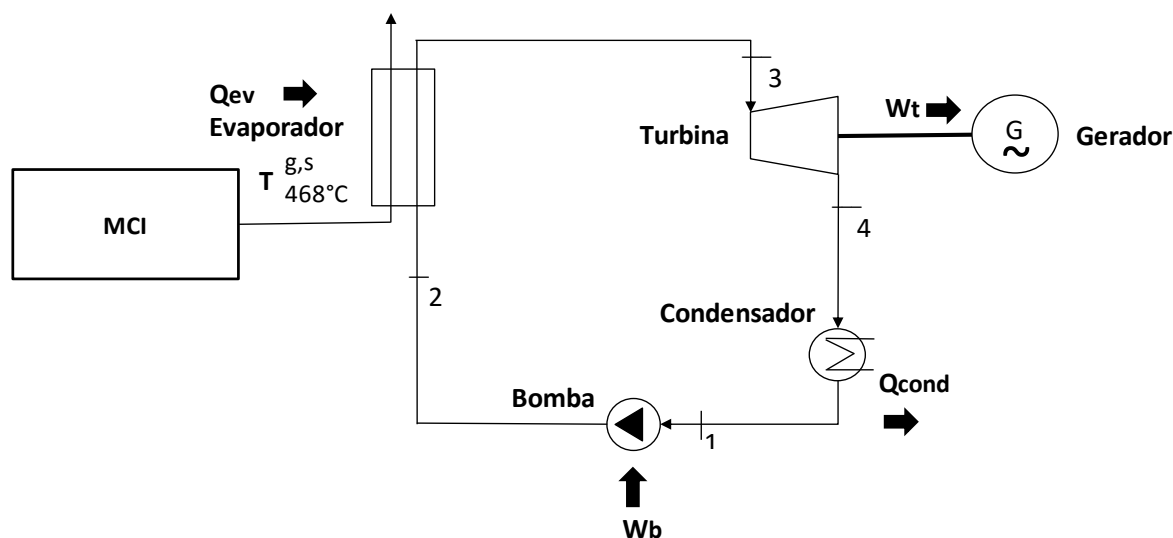


Figura 2-31 Ciclo Orgânico de Rankine

Fonte: Adaptado de Vaja e Gabarotta (2010)

O fluido de trabalho mais utilizado na tecnologia de ORC é o pentafluoropropano - R245fa por não ser tóxico, não ser inflamável e não agredir a camada de ozônio, em comparação a outros

fluidos orgânicos e, principalmente, por apresentar alta eficiência em baixas temperaturas, quando comparados com a água (VAJA e GAMBAROTTA, 2010). Na Figura 2-32 é possível observar que o ponto crítico dos fluidos orgânicos apresenta baixas temperaturas quando comparado com a água. Esta situação é bem-vinda na utilização de gases de exaustão dos MCI que apresentam temperatura dos gases de exaustão em torno de 450°C. Como existem perdas no processo de recuperação dos gases de exaustão o uso de fluido de trabalho que tenha boa eficiência em temperaturas baixas é fundamental no processo.

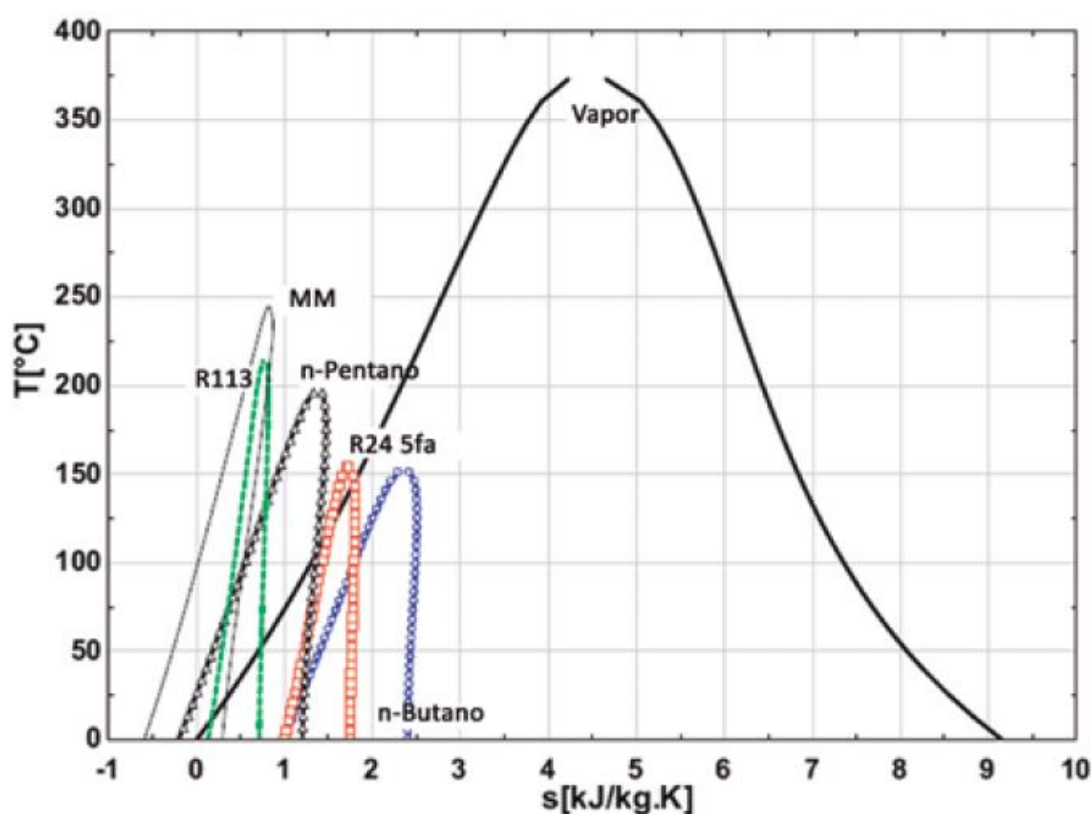


Figura 2-32 Diagrama T-s para água e diferentes fluidos orgânicos

Fonte: Tchange (2011)

Atualmente, é possível encontrar módulos de ORC comerciais e de várias potências que possam ser utilizados com calor residual dos MCI. A tabela Tabela 2-9 apresenta os principais fabricantes e a potência dos módulos disponíveis.

Tabela 2-9 Principais fabricantes e faixa de potência dos módulos ORC

| Empresas                           | Range de Potência |
|------------------------------------|-------------------|
| Ormat                              | 250 – 20.000 kW   |
| Turboden                           | 400 – 15.000 kW   |
| Adoratec                           | 300 – 2.400 kW    |
| GMK                                | 500 – 2.000 kW    |
| Siemens                            | 600 – 1.000 kW    |
| Freepower                          | 130 kW            |
| GE- General Electric: Clean Cycle™ | 125 kW            |
| Calnetix                           | 125 kW            |
| Verdicorp                          | 20-115 kW         |
| ElectraTerm                        | 50 kW             |
| Infinity Turbine                   | 10-50 kW          |

Fonte: Larjota et all (2011)

Portanto, é possível escolher dentre os inúmeros fabricantes e faixas de potência dos módulos ORC aquele que mais se adequa ao MCI adotado. Atualmente o custo de sistemas ORC está entre 6.200 a 10.700 USD/kWe. Observe na Figura 2-33 que quanto menor a potência do módulo ORC maior o custo como é de se esperar.

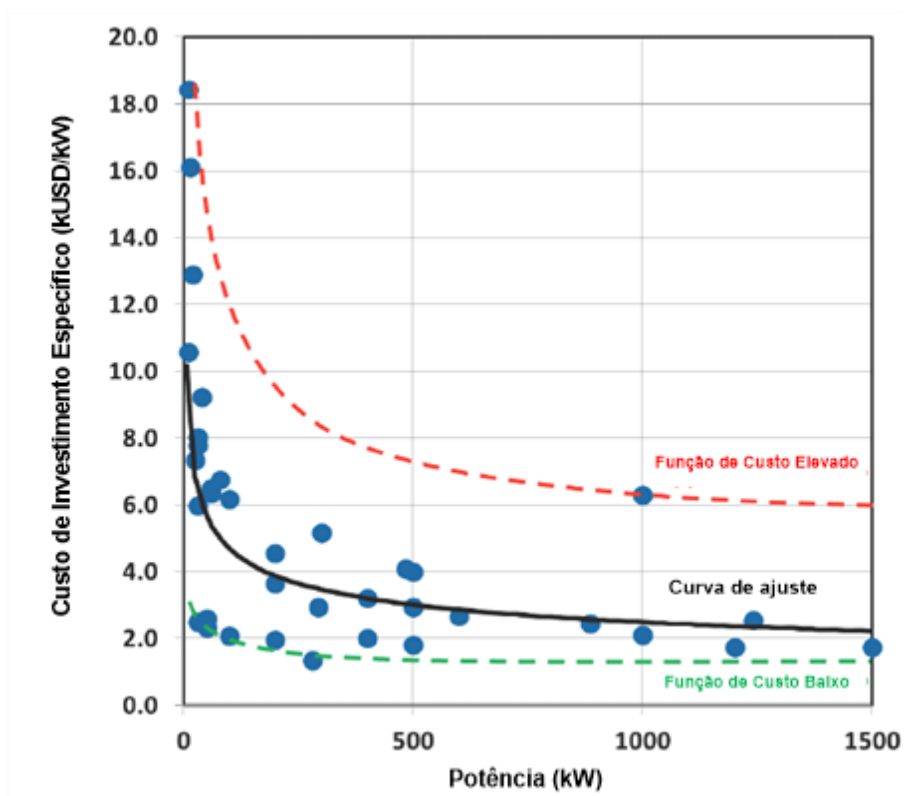


Figura 2-33 Custo específico de sistemas ORC

Fonte: Rettig et al. (2011)

## 2.7 Energia Solar Fotovoltaica - PV

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de gerar energia elétrica através das chamadas células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são feitas de materiais capazes de transformar a radiação solar diretamente em energia elétrica através do chamado “efeito fotovoltaico”. Hoje, o material mais difundido para este uso é o silício. O levantamento do recurso solar para fins de aproveitamento energético é a maneira mais usual de se apresentar os dados solarimétricos medidos em termos de energia por unidade de área, ou irradiação, no plano horizontal. Dependendo da aplicação, medições com bases mensal, diária ou horária podem ser utilizadas. Após a coleta e tratamento dos dados, os valores médios de radiação ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) ou irradiação ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) são definidos.

As células de silício monocristalino são as mais utilizadas, cuja disposição é apresentada na Figura 2-34 (PINHO, 2008).

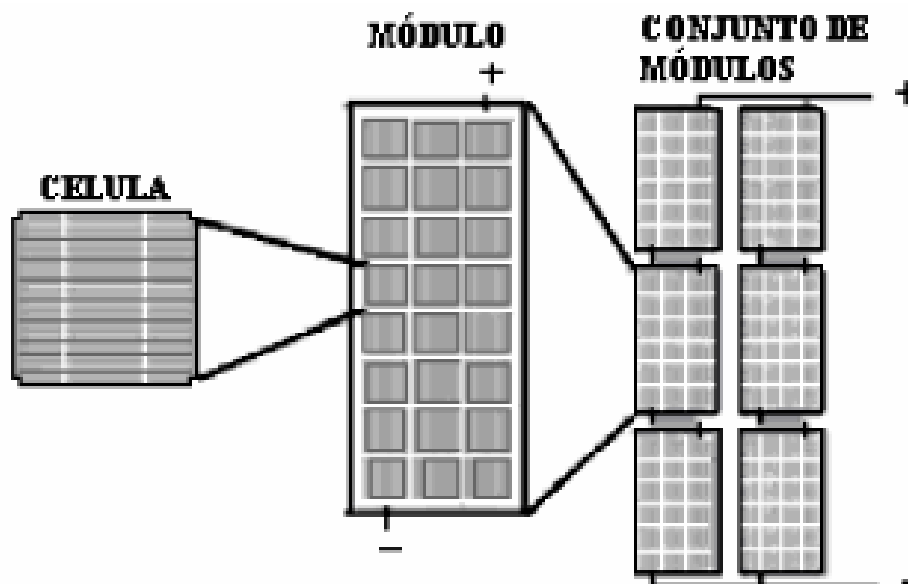


Figura 2-34 Hierarquia fotovoltaica

Fonte: Pinho (2018)

Os módulos fotovoltaicos são associados em série e paralelos para garantir os níveis de potência, corrente e tensão desejados. Uma associação de módulos dá origem a um gerador ou arranjo fotovoltaico. Quando se tem painéis em série, a tensão do sistema é a soma da tensão dos módulos individuais e a corrente é igual a corrente de um único módulo. Quando ligados em paralelo, apresenta a inversa. Geralmente existem ligações em série e paralelo em um único arranjo, conforme a Figura 2.34.

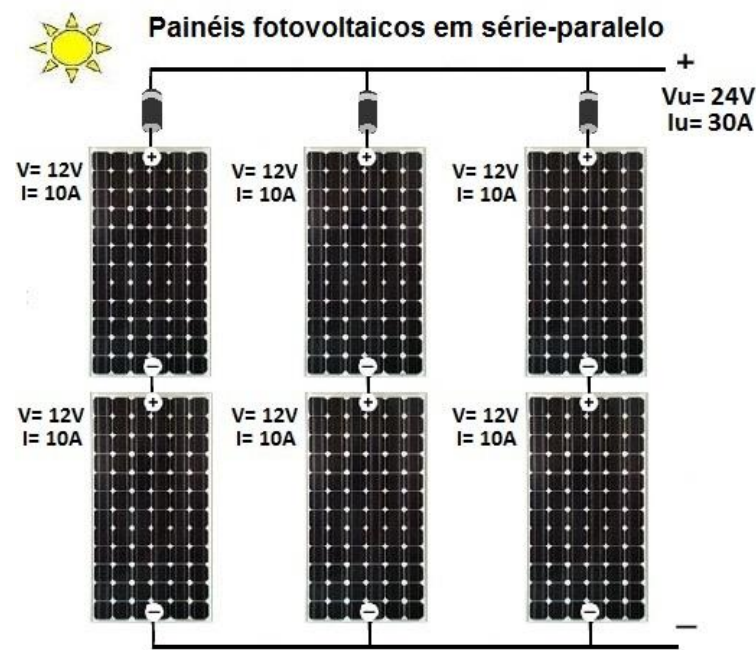


Figura 2-35 Arranjo série/paralelo de módulos fotovoltaicos

Fonte: Pinho (2018)

A potência do arranjo é dada pela equação da potência (Equação 2.9)

$$P = I * V \quad (2.8)$$

Onde:

- P: Potência do arranjo fotovoltaico (kW)
- V: Tensão do arranjo fotovoltaico (V)
- I: Corrente do arranjo fotovoltaico (A)

O uso de PV em sistemas de geração a MCI, assim como os módulos ORC, auxiliam na redução do consumo de combustível global do sistema, tendo em vista que parte da energia fornecida pelo sistema será provido pela energia solar reduzindo, assim, o consumo de combustível.

Os componentes básicos de um sistema fotovoltaico (PV), além dos painéis fotovoltaicos, mencionados, são:

- **Acumuladores de energia (banco de baterias):** A função prioritária das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz durante as horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de mau tempo. Outra importante função das baterias é prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. Este é o caso do sistema utilizado na dissertação, ou seja, acumular energia durante o dia para utiliza-la no horário de ponta à noite. Utiliza-se, principalmente, baterias de 12V/150Ah projetadas para sistemas fotovoltaicos, com ciclos de carga e descarga diários.

- **Sistema de condicionamento de carga:** Composto pelos inversores de frequência cuja função é transformar a energia de corrente contínua (CC) produzida nos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), para que possa ser utilizada pelos consumidores, além dos controladores de carga responsáveis por regular a carga ou a tensão, de acordo com o perfil de consumo e operação. O controlador de carga é um equipamento normalmente associado ao arranjo fotovoltaico em sistemas híbridos.

### 2.7.1 Dimensionamento de Sistema de Geração Fotovoltaicos Isolados

Os sistemas de geração elétrica fotovoltaicos podem ser conectados à rede elétrica ou isolados. O dimensionamento de Sistemas Isolados é relativamente simples.

Como exemplo, será calculado um sistema fotovoltaico de 1 kWp, para o qual se tem referência de preço que hoje está em torno de R\$ 10.000/kW instalado.

Observando na Figura 2-36, o ponto vermelho referente à cidade de Jacareacanga, de acordo com a escala, a localidade recebe 5h diárias de insolação.

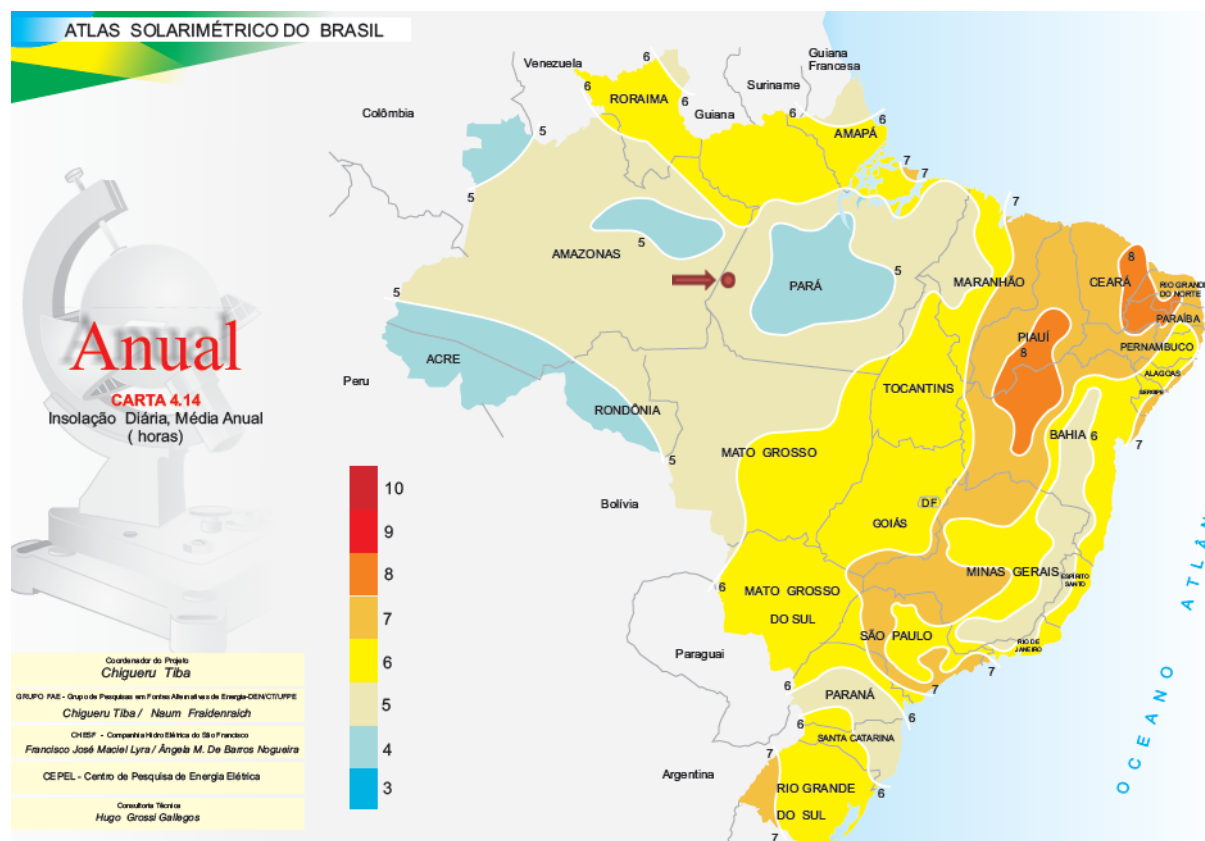


Figura 2-36 Atlas solarimétrico do Brasil

Fonte: Chigueru Tiba (2010)

Assim, o exemplo de cálculo prevendo uma utilização de 4 horas diárias é dada pela Equação 2.9.

$$\begin{aligned}
 N_{PLACAS} &= \frac{E_{Instalação} (Wh) * t(h)}{I(h)} * \left( \frac{1}{ef} \right) * \left( \frac{1}{E_{Placa}} \right) \\
 &= \frac{1000Wh * 4h}{5h} * \left( \frac{1}{0,83} \right) * \left( \frac{1}{250Wh} \right) = 3,855 = 4
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Onde:

|                  |                                                         |
|------------------|---------------------------------------------------------|
| $E_{Instalação}$ | Energia consumo em um dia (Wh);                         |
| $t$              | Tempo de utilização da instalação em um dia (horas);    |
| $I$              | Tempo de insolação, de acordo com a localidade (horas); |
| $ef$             | A eficiência do sistema. adota-se 83; e                 |
| $E_{Placa}$      | Energia do painel adotado (Wh).                         |

Neste caso um painel de 250Wp seria suficiente para gerar 1Wh durante 4 horas.

Utilizando uma bateria de chumbo-ácido de 12V/150Ah= 1.800Wh o sistema é calculado de acordo com a Equação 2.10.

$$Bat. = \frac{4000Wh}{1800Wh} = 2,222
 \tag{2.10}$$

Observe que o resultado da Equação 2.10 está fracionado devendo ser escolhido número inteiro superior. Porém, antes de efetuar este arredondamento, multiplica-se o resultado por 3 para garantir a vida útil do conjunto de baterias. Ou seja, 3 baterias seriam suficientes para a geração, mas, devido ao processo de carga e descarga, multiplica-se 2,222 por 3, resultando em 6,667. Então, para suprir a geração de 1.000 W por 4h diárias, e também garantir a vida útil da bateria, utiliza-se 7 baterias. Existem hoje vários fabricantes de painéis fotovoltaicos, sendo os principais apresentados na Tabela 2-10:

Tabela 2-10 Principais empresas de PV

| Empresas   | Potência p/ painel |
|------------|--------------------|
| Isofoton   | 250 Wp             |
| Sunpower   | 245 Wp             |
| Schotsolar | 270 Wp             |
| SolarWorld | 260 Wp             |
| Suntech    | 250 Wp             |
| Trinasolar | 250 Wp             |

Fonte: Portal solar (2015)

## **3 DIAGNÓSTICO DAS USINAS TERMELÉTRICAS DOS SISTEMAS ISOLADOS**

### **3.1 Introdução**

Este capítulo realiza um diagnóstico das usinas termelétricas pertencentes aos Sistemas Isolados Brasileiro, buscando identificar os pontos fortes e fracos para que se possa propor alternativas adequadas para a redução do consumo de combustível destes sistemas. Para isto, foram utilizados os dados de campo de usinas termelétricas a diesel, as quais operam com unidades geradoras de Motores de Combustão Interna (MCI), e que possuem Sistema de Coleta de Dados (SCD) implantados para registro das grandezas elétricas e de consumo de combustível.

Ao se falar do cenário atual dos Sistemas Isolados, convém lembrar brevemente o que foi dito no item 2.4.5.1.1 - Custo Total com Combustível, o qual define que as usinas recebem o reembolso do combustível utilizado no mês até o limite de consumo específico estabelecido pela a ANEEL na Resolução Normativa nº 427 de 2011 (REN nº 427, 2011), definidos para cada potência instalada nas usinas.

A reestruturação do setor elétrico brasileiro introduziu novos conceitos de competição na geração de energia elétrica. A ampliação de exigências voltadas para a sustentabilidade dos meios de geração em termos técnicos e ambientais, relacionada com a redução de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera e a necessidade de ampliar o suprimento de energia elétrica para a população brasileira, motivaram a criação de incentivos ao desenvolvimento de alternativas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Esta conjuntura pode ser observada nos ISOL em vários aspectos, dentre eles, especialmente, a redução gradual, ao longo dos últimos anos, dos limites de consumo específico estabelecidos pela ANEEL e da sub-rogação dos recursos da Conta de Consumo de Combustível (CCC) que reembolsa até 75% do investimento de alternativas que substituam total ou parcialmente o consumo de combustível fóssil nas usinas termelétricas dos Sistemas Isolados.

### **3.2 Eficiência de Geração nas Usinas Termelétricas - UTE**

Os Sistemas Isolados possuem uma população de 226 usinas termelétricas atendidas pela CCC. Para a tabulação dos dados coletados durante esta dissertação, foi retirada uma amostra de 122 usinas termelétricas a diesel.

As outras 104 usinas foram excluídas da análise por apresentarem dados de consumo de combustível e geração inconsistentes, visto que o Sistema de Coleta de Dados não está implantado em todas as usinas ou apresentam algum tipo de problema no envio dos dados, tais como

fluxômetros para medição combustível inoperantes em algumas usinas e sistema de monitoramento queimado, por descarga atmosférica, como exemplificado nas Figura 3-1 e Figura 3-2.

Na Figura 3-1 – b observa-se o medidor de energia queimado devido a descarga atmosférica. Já na Figura 3-2 –b observa-se o fluxômetro desligado inoperante com o cabeamento deteriorado, como exemplos dos problemas encontrados durante a aquisição de dados e por isto a amostra de usinas possui 122 usinas.



a)



b)

Figura 3-1 – Medidor de energia- SCD, a) operando - usina no Pará e b) queimado – usina em Roraima

Fonte: Figura do autor



a)



b)

Figura 3-2 - Fluxômetro para medição de combustível a) operando e calibrado – usina no Pará e b) inoperante – usina no Amazonas

Fonte: Figura do autor

As medições de consumo de combustível e geração de energia elétrica utilizados na tabulação dos dados são referentes ao mês de dezembro de 2014, por ser o mês que apresentou maior quantidade de dados consistentes, tendo em vista que a obrigação da medição eletrônica de combustível, através do Sistema de Coleta de Dados – SCD, se consolidou em 2014.

De posse dos dados de consumo de combustível e geração de energia, juntamente com o limite de consumo específico de cada usina, foi aplicada a Equação 3.1, a qual permite calcular o percentual de combustível reembolsável na usina de acordo com o seu consumo mensal e os limites definidos na legislação. Com isto, foi possível comparar usinas com consumos e potência diferentes trazendo todas para a mesma base de comparação que é o percentual.

$$CR_{\%} = \left( 1 - \left( \frac{C_{glosa}}{C_{Reemb}} \right) \right) * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

|               |                                                                                                                                      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $CR_{\%}$ :   | Percentual de Combustível Reembolsável mensal da usina em relação ao limite de consumo específico máximo estabelecido pela ANEEL (%) |
| $C_{glosa}$ : | Montante de combustível glosado por exceder o limite de consumo específico da usina (L)                                              |
| $C_{Reemb}$ : | Montante de combustível reembolsado por estar dentro do limite de consumo específico da usina (L)                                    |

A Figura 3-3 é obtida utilizando a Equação 3.1 apresentando o percentual de combustível reembolsável mensal das usinas em relação ao limite de consumo específico da ANEEL estabelecido para cada usina. É possível observar que a maioria das usinas analisadas não conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite máximo permitido para cada usina, ou seja não recebem 100% de reembolso de combustível utilizado.

Observa-se na Figura 3-3 que apenas 25, ou seja 20,5%, das 122 usinas avaliadas estão gerando energia com consumo específico de combustível dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL. Todas as outras recebem o reembolso do combustível de acordo com o percentual apresentado no gráfico.

Ressalta-se também que a linha em vermelho na Figura 3-3 refere-se às potências instaladas nas usinas, o que mostra que a baixa eficiência não está apenas em uma determinada faixa de potência, mas sim em todas as faixas de potência.

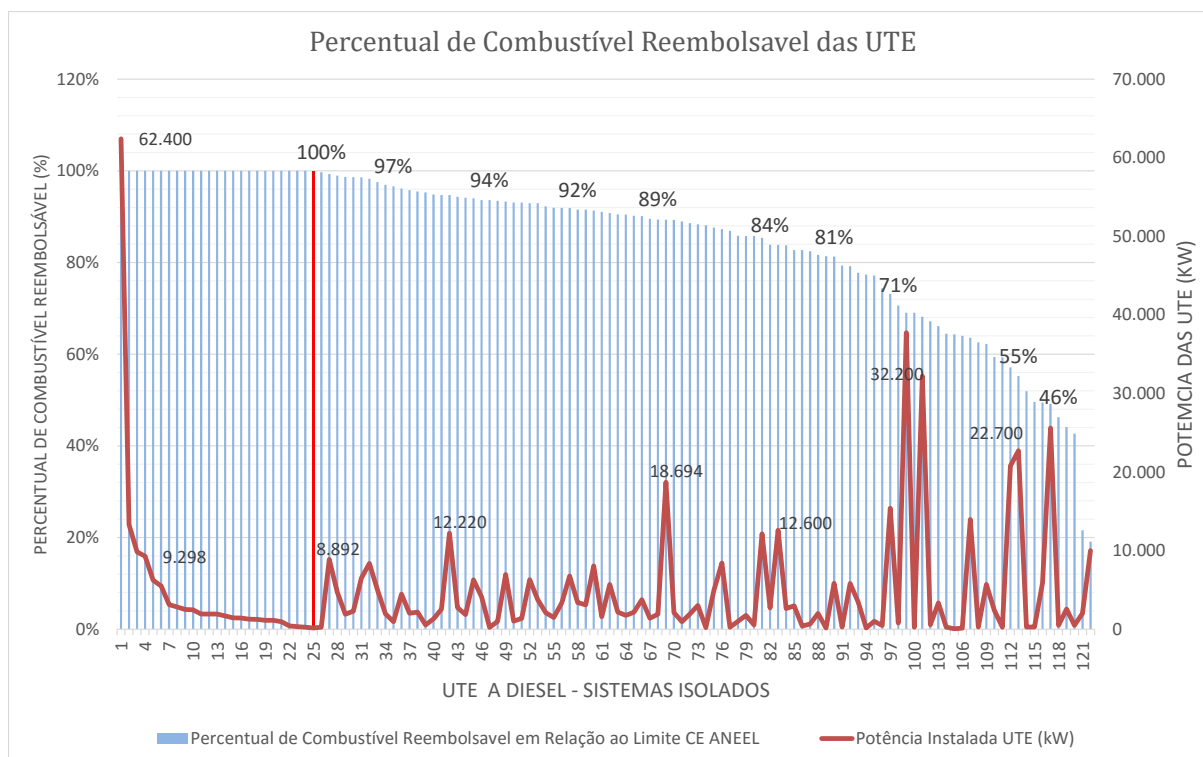


Figura 3-3 Desempenho das usinas em relação ao consumo específico limitante da ANEEL

Fonte: Baseado nos dados tabulados do Sistema de Coleta de Dados (2014)

A baixa eficiência resultou, somente no mês de dezembro de 2014, um prejuízo em torno de 28 milhões de litros de diesel nas usinas nos Sistemas Isolados. Considerando o período de um ano, alcança-se algo em torno de 126 milhões de litros de diesel não reembolsado nos Sistemas Isolados. A Tabela 3-1, apresenta estes dados com mais detalhes.

Tabela 3-1 Combustível reembolsado nos Sistemas Isolados - Dez 2014

| Reembolso Combustível - Dez 2014 |            |        |             |
|----------------------------------|------------|--------|-------------|
|                                  | Diesel (l) | %      | R\$         |
| <b>Reembolsado (L)</b>           | 57.727.343 | 84,5%  | 151.418.821 |
| <b>Não Reembolsado (L)</b>       | 10.549.558 | 15,5%  | 27.671.491  |
| <b>Total</b>                     | 68.276.901 | 100,0% | 179.090.311 |

### 3.3 Estímulo à Redução do Consumo de Diesel

Ao longo dos últimos anos, a ANEEL vem alterando os limites de consumo específico previstos em norma, que limitam ao valor apurado de consumo específico mensal verificado nas usinas termelétricas dos ISOL. Até o ano de 2007, o limite de consumo específico era de 0,300 (L/kWh) para usinas com motores de combustão interna, independente da sua configuração, ou seja, até aquele ano não havia distinção de limite de consumo específico por faixa de potência instalada. Como incentivo à redução do consumo de combustíveis fósseis e também para atender uma

demanda dos agentes geradores, pois as usinas com potência abaixo de 1MW dificilmente conseguiam gerar energia com consumo específico abaixo de 0,300 (L/kWh), foi realizada uma revisão do limite de consumo específico que teve como base o estudo desenvolvido no CEPEL (FLEURY e VIEIRA, 2008).

A metodologia apresentada pelo CEPEL consiste em relacionar o consumo específico à plena carga dos MCI a diesel em função de sua potência. Foram levantados os dados de aproximadamente 100 grupos geradores de vários fabricantes conforme apresentado na Figura 3-4.

Para os grupos geradores pequenos, ou seja, com potência < 150 kW, o consumo específico de 0,300 L/kWh é ultrapassado mesmo em plena carga, que é a condição ótima do motor, segundo dados dos próprios fabricantes. Já para as outras unidades geradoras avaliadas, o consumo específico ficou entre 0,250 a 0,300 L/kWh à plena carga.

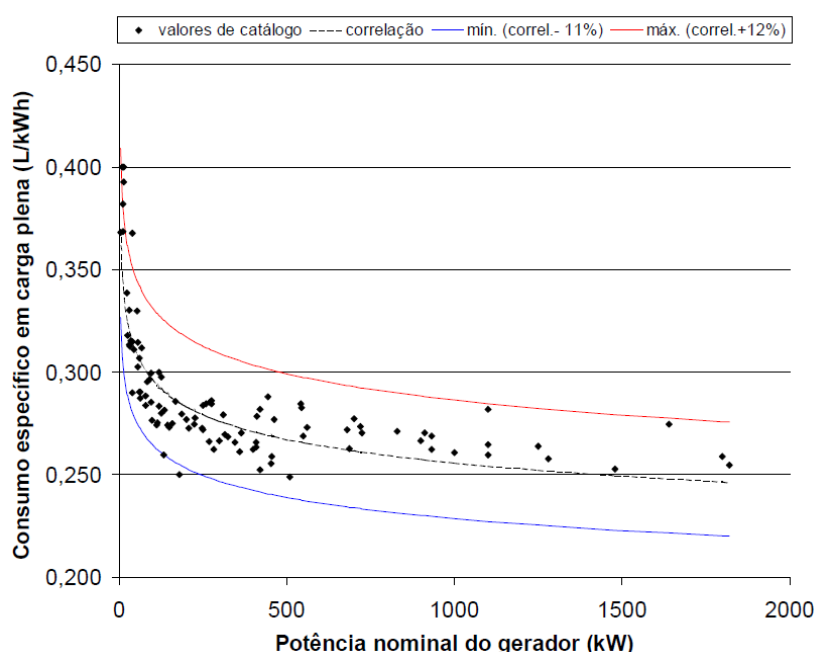


Figura 3-4 Consumo específico de geradores diesel em carga plena (carregamento = 100%) em função da potência nominal

Fonte: Fleury e Vieira (2008)

Com esses dados, as Figura 3-5 e Figura 3-6 mostram o consumo específico de geradores de diversas potências operando com carregamentos de 75% e 50% respectivamente (FLEURY e VIEIRA, 2008).

Além disso, ressalta-se que a condição de carregamento de 25% é pouco utilizada, devido ao dimensionamento das unidades geradoras para as demandas de energia das localidades, pois quanto menor o carregamento, maior o consumo específico nas unidades geradoras.

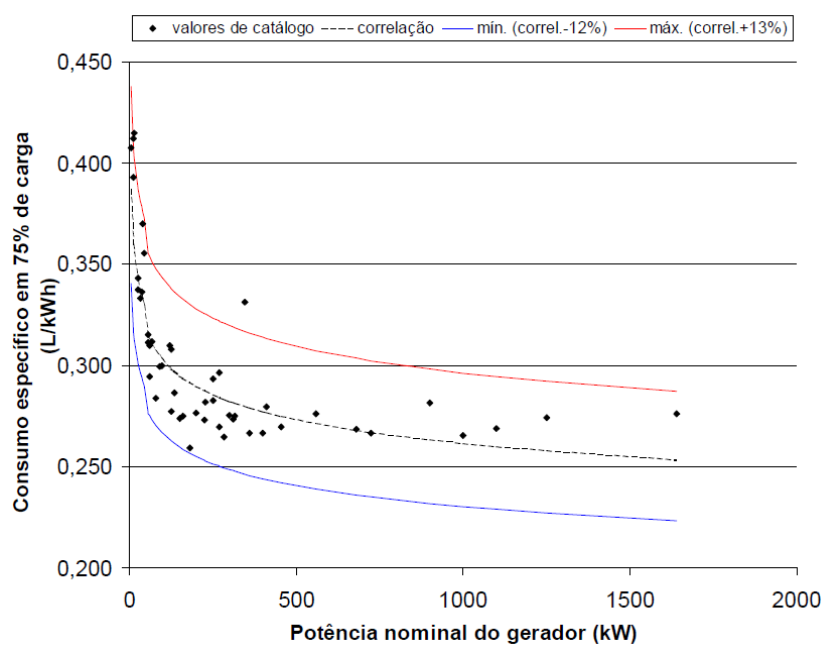


Figura 3-5 Consumo específico de geradores diesel em 75% de carga plena (carregamento = 75%) em função da potência nominal

Fonte: Fleury e Vieira (2008)

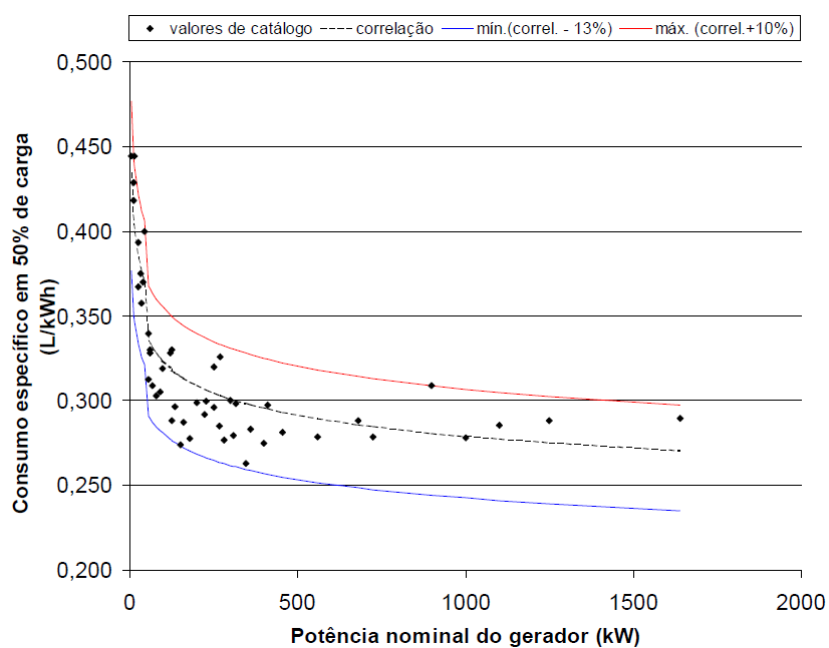


Figura 3-6 Consumo específico de geradores diesel em 50% de carga plena (carregamento = 50%) em função da potência nominal

Fonte: Fleury e Vieira (2008)

Através das análises gráficas apresentadas anteriormente, pode-se perceber que o consumo de combustível aumenta conforme o fator de carregamento diminui, independente do modelo ou potência dos MCI.

Além disso, a potência média dos geradores em operação em uma UTE tem grande influência no consumo específico da UTE, uma vez que, à medida que se aumenta a potência nominal dos grupos geradores, diminui seu consumo específico para um dado carregamento.

Conforme consta no Plano de Operação Eletrobras (2015), as usinas dos Sistemas Isolados possuem unidades geradoras com potência semelhantes, ou seja a potência média dos geradores da usina pode ser calculada de forma direta, dividindo a potência total instalada na usina pelo número de unidades geradoras existente na usina.

A partir de 2008, a ANEEL passou a adotar limites de consumo específico de acordo com a potência instalada na usina, com o objetivo de melhorar a eficiência na geração dos parques termelétricos e eliminar distorções entre os limites adotados para usinas de grande e pequeno portes.

Estas alterações foram corroboradas através do Decreto nº 7.246/2010 e da Portaria do Ministério de Minas e Energia (MME) nº 600/2010, as quais estabeleceram que o fornecimento de energia elétrica nos Sistemas Isolados deve buscar a eficiência econômica e energética, a mitigação de impactos ambientais e a utilização de recursos energéticos locais, visando atingir a sustentabilidade econômica da geração de energia elétrica.

A Figura 3-7 apresenta de forma gráfica os dados da Tabela 3-3, mostrando os limites de consumo específico definidos para os anos de 2011 e 2012, que foram os anos de transição no processo de redução dos limites definidos pela ANEEL, para que os agentes geradores pudessem se adaptar, sendo que a partir de 2014 observa-se uma acentuada redução destes limites para UTE maiores do que 10 MW.

A partir de 2014 os limites são mantidos para os próximos anos sem previsão de alteração.

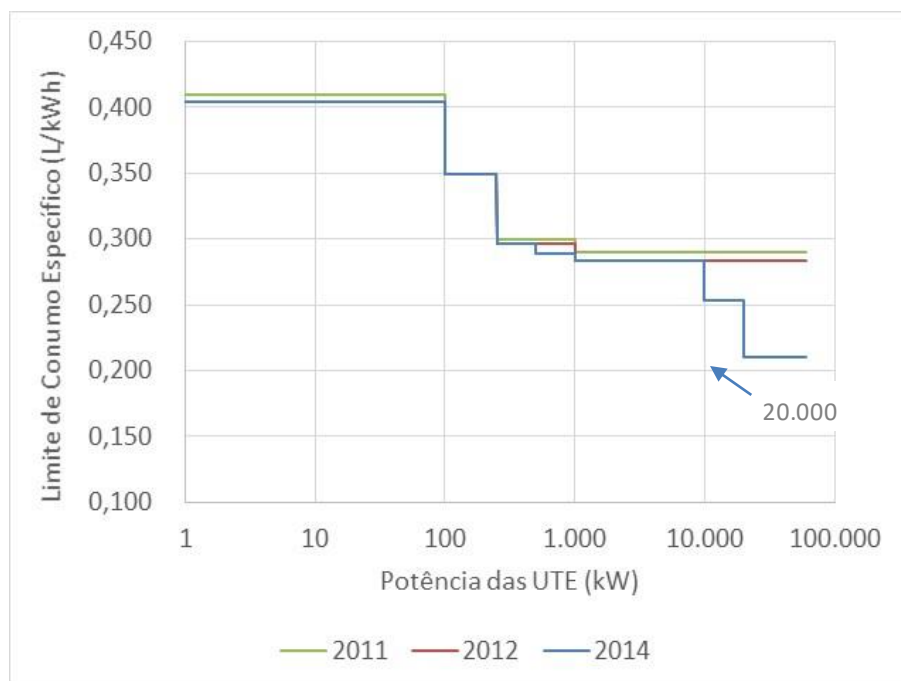


Figura 3-7 Evolução dos limites de consumo específico

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Tabela 3-2

Tabela 3-3 Evolução dos limites de consumo específico

| Faixa de Potência (kW) |        | 2011  | 2012  | 2014  |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|
| 1                      | 100    | 0,409 | 0,409 | 0,404 |
| 101                    | 250    | 0,349 | 0,349 | 0,349 |
| 251                    | 500    | 0,329 | 0,329 | 0,329 |
| 501                    | 750    | 0,300 | 0,296 | 0,296 |
| 751                    | 1.000  | 0,300 | 0,296 | 0,289 |
| 1.001                  | 2.500  | 0,300 | 0,296 | 0,289 |
| 2.501                  | 5.000  | 0,290 | 0,283 | 0,283 |
| 5.001                  | 7.500  | 0,290 | 0,283 | 0,283 |
| 7.501                  | 10.000 | 0,290 | 0,283 | 0,283 |
| 10.001                 | 12.500 | 0,290 | 0,283 | 0,253 |
| 12.501                 | 15.000 | 0,290 | 0,283 | 0,253 |
| 15.001                 | 20.000 | 0,290 | 0,283 | 0,253 |
| 20.001                 | acima  | 0,290 | 0,283 | 0,210 |

Fonte: Adaptado de REN nº 427 ANEEL (2011)

Tendo em vista que as usinas termelétricas não estão conseguindo gerar energia dentro dos limites previstos, conforme apresentado no item 3.2, onde apenas 20,5% das usinas conseguem a eficiência máxima, ou seja são reembolsadas por todo o combustível consumido, será dado prosseguimento à análise da distribuição das usinas, bem como as configurações dos MCI presentes em todos os Sistemas Isolados no Brasil em busca do porquê das usinas não conseguirem atingir aos limites de consumo específico menores que o máximo permitido.

### 3.4 Curvas Características dos MCI dos Sistemas Isolados- Curvas ISO

As curvas características são utilizadas para analisar o comportamento do Consumo Específico (L/kWh) dos MCI, em função do fator de carga da potência nominal informada nas folhas de dados dos motores de acordo com os fabricantes.

Estas curvas características são normalmente conhecidas como curvas ISO e representam as condições padrão de referência definidas por norma internacional estabelecidas pela “*International Organization for Standardization – ISO*”.

A norma que estabelece as condições-padrão de referência para os MCI é a norma internacional ISO 3046, “Part 1, Standard Reference Conditions”. Os fabricantes seguem esta norma para avaliação do desempenho dos motores, a qual estabelecem as seguintes condições de referência:

- Pressão Barométrica: 100 kPa (29.53 in Hg);
- Temperatura do Ar: 25 °C (77 °F);
- Altitude: 110 m (361 ft)
- Umidade Relativa do Ar: 30%.

No Brasil, a norma ABNT NBR ISO 3046 (Motores de combustão interna alternativos – Desempenho Parte 1: Condições-padrão de referência e declarações de potência e de consumos de combustível e óleo lubrificantes), é idêntica a norma internacional citada.

Através de dados de campo levantados durante inspeções técnicas nas usinas nos ISOL, foi possível identificar os modelos e fabricantes dos MCI utilizados nos parques termelétricos e, em seguida, consultar os sites dos fabricantes em busca dos dados de referência de cada motor.

A comparação das curvas ISO com os limites de consumo específico ANEEL é uma referência para identificar as características de consumo dos motores indicando se os mesmos estão abaixo ou acima dos limites previstos. A seguir, são apresentadas, para cada faixa de potência, conforme Tabela 3-3, as Curvas ISO de consumo específico dos MCI mais utilizadas nos Sistemas Isolados.

#### 3.4.1 Curvas ISO Motores de 1 a 100 kW

A Cummins é o fabricante mais comumente encontrado nos motores nesta faixa de potência nas usinas dos Sistemas Isolados Brasileiros.

De acordo com as curvas ISO, todos os motores conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,404 L/kWh, definido para motores de 1 a 100 kW pela legislação, exceto por um modelo que, conforme o gráfico, assume valores acima do limite para carregamento inferior a 75%. Para esta faixa de potência, observa-se que, mesmo com baixo carregamento dos motores (próximo de 25%), o limite de consumo específico não foi ultrapassado. Esta situação é

fundamental, pois nas localidades com demanda próxima a esta potência, tem-se muita variação de carga ao longo do dia e baixa demanda nos períodos noturnos, logo após o horário de ponta, que ocorre geralmente até as 21:00.

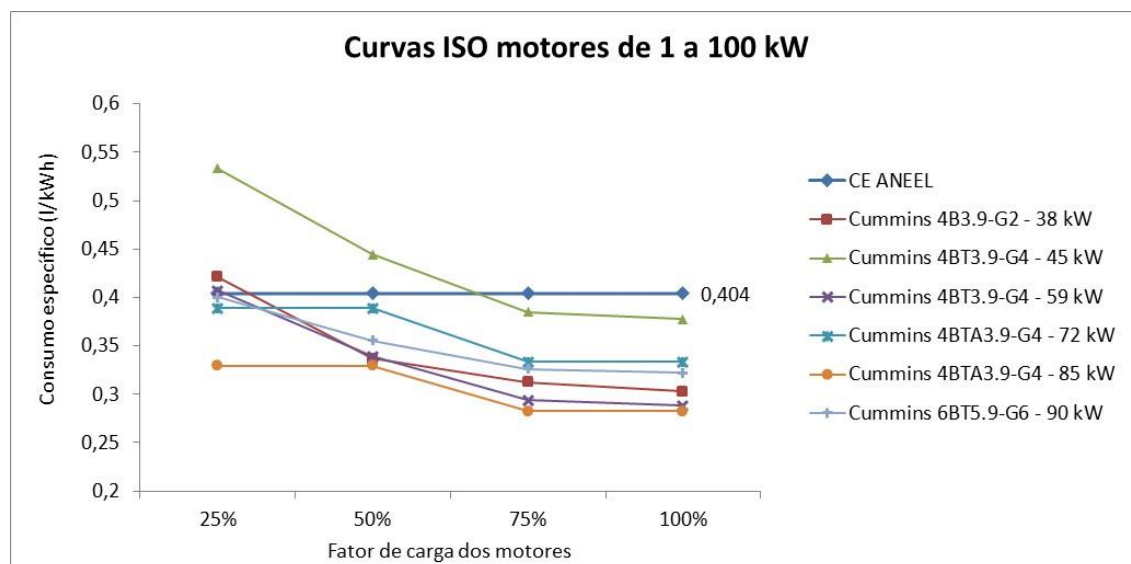


Figura 3-8 Curvas ISO MCI de 1 a 100 kW

Fonte: Baseado em Cummins (2015)

### 3.4.2 Curvas ISO Motores de 101 a 250 kW

Na Figura 3-9, os motores conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,349 L/kWh definido para motores de 101 a 250 kW pela legislação, exceto por um modelo que conforme o gráfico, assume valores acima do limite para carregamento inferior a 75%.

Para esta faixa de potência, observa-se que, mesmo com baixo carregamento dos motores (próximo de 25%), o limite de consumo específico não foi ultrapassado. Esta situação é semelhante a encontrada nos motores do item 3.4.1.

Observa-se que, de acordo com os valores de consumo específico dos motores desta faixa de potência, seria possível utiliza-los também para gerar energia na faixa de potência do item 3.4.1. Entretanto, esta opção não é interessante em termos de projeto, tendo em vista que, ao se adotar um motor maior na usina com demanda baixa, a potência instalada passa a ser maior e consequentemente o limite de consumo específico fica mais restritivo nesta usina.

Deste modo, uma “sintonia” entre a demanda da localidade e o dimensionamento das unidades geradoras que compõem a usina deve ser levada em conta na hora de escolher os motores.

Esta “sintonia” seria o dimensionamento mínimo para que a usina possa atender a demanda da localidade, levando-se em conta as paradas para manutenções preventivas e corretivas e necessidades de unidades reservas para garantir o fornecimento de energia.

Neste contexto, considera-se que as manutenções corretivas e preventivas devam ficar restritas a, no máximo, 20% da potência nominal da usina. Sendo assim, tem-se um dimensionamento mínimo do parque que garante o atendimento à demanda da localidade caso haja perda da maior unidade geradora.

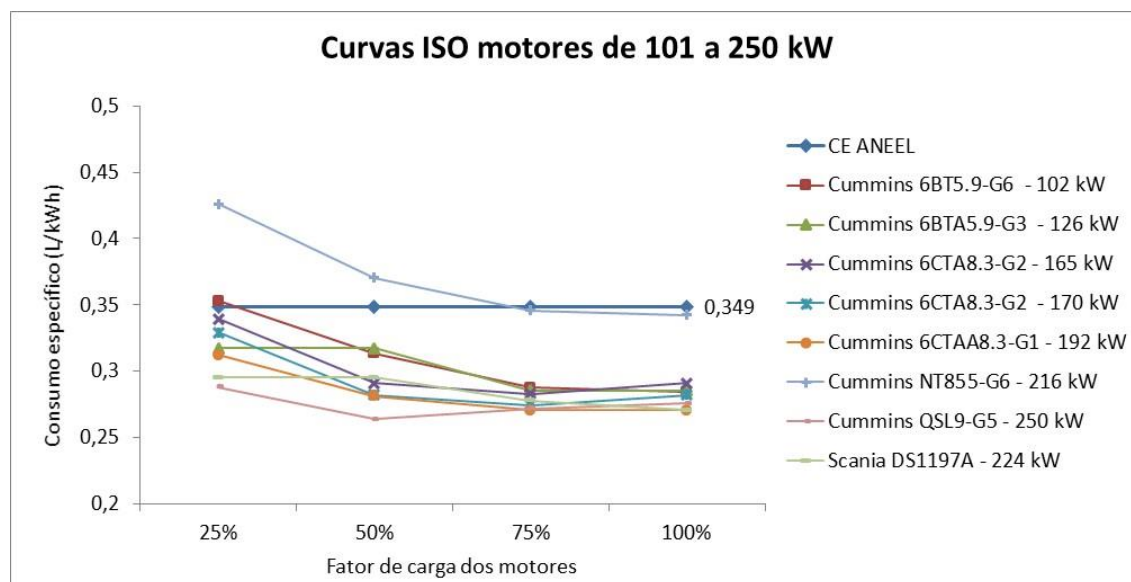


Figura 3-9 Curvas ISO MCI de 101 a 250 kW

Fonte: Baseado em Cummins (2015) e Scania (2015)

### 3.4.3 Curvas ISO Motores de 251 a 500 kW

Do mesmo modo, a Figura 3-10, apresenta os dados de consumo específico para os motores do fabricante Cummins por ser o mais utilizado nesta faixa de potência, ressaltando que o fabricante Guascor também é frequentemente encontrado nas usinas dos Sistemas Isolados nesta faixa de potência.

Todos os motores conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,329 L/kWh estabelecido para esta faixa de potência. Entretanto, os motores com carregamento abaixo de 50% assumem valores de consumo específico acima do limite.

Neste caso, a operação destes motores requer maior atenção para que não ocorra a operação com baixo carregamento devido à restrição de operação imposta pela legislação.

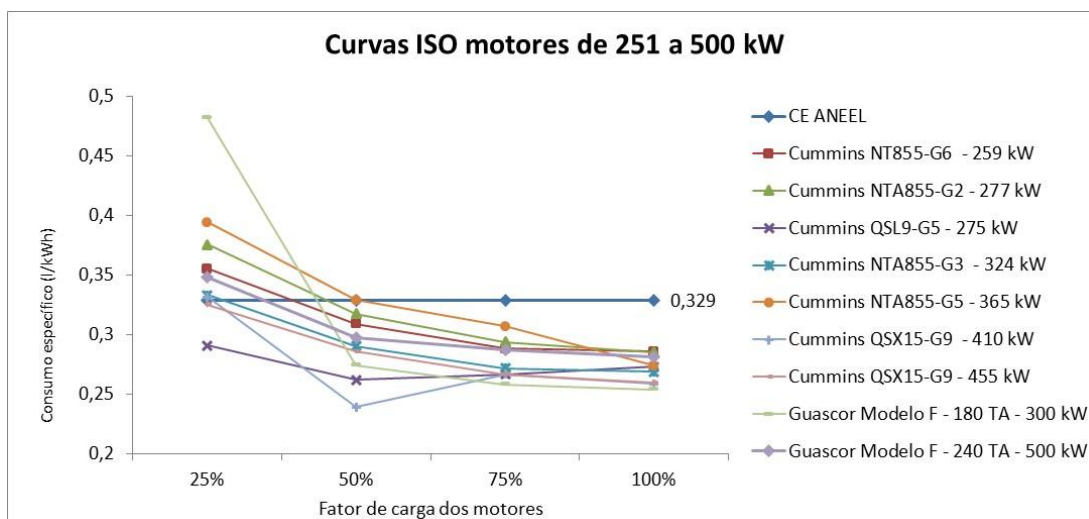


Figura 3-10 Curvas ISO MCI de 251 a 500 kW

Fonte: Baseado em Cummins (2015) e Guascor (2015)

### 3.4.4 Curvas ISO Motores de 501 a 750 kW

Nesta faixa de potência, na Figura 3-11, já aparecem outros fabricantes, diferentes dos apresentados até o momento, predominando a empresa Perkins.

Todos os motores conseguem, assim como anteriormente, gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,296 L/kWh estabelecido. No entanto, observa-se que estes valores estão muito próximo do limite. Como as curvas ISO são para condições padrão geralmente encontradas em ambiente controlado de laboratório, na prática os motores com consumo específico próximo ao valor limite deve ultrapassá-lo.

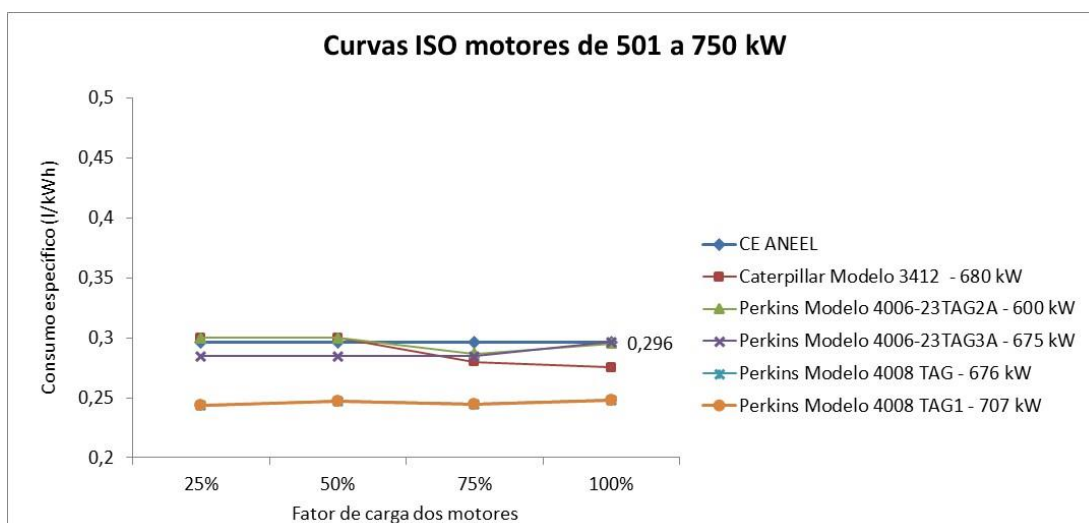


Figura 3-11 Curvas ISO MCI de 501 a 750 kW

Fonte: Baseado em Perkins (2014) e Caterpillar (2015)

### 3.4.5 Curvas ISO Motores de 751 a 2500 kW

Esta faixa de potência, como pode ser observado na Figura 3-12, é onde se situam a maioria dos modelos de motores presentes nas usinas dos Sistemas Isolados.

Observa-se que o comportamento das curvas é semelhante, onde praticamente todos os modelos conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,289 L/kWh. Entretanto, para 2 modelos Perkins, o consumo específico aumenta após 75% de carga; esta informação é dada pelo fabricante devido às características de projeto, tendo seu ponto ótimo próximo à 75% de carga.

Vale ressaltar também que estes motores devem operar com fator de carga acima de 50% para terem consumo específico adequado ao limite ANEEL para esta faixa de potência. Segundo a Cummins (CUMMINS POWER, 2014) em seus manuais de operação das unidades geradoras, não se recomenda a operação em baixa carga por ser antieconômico, ou seja, acarreta aumento do consumo específico.

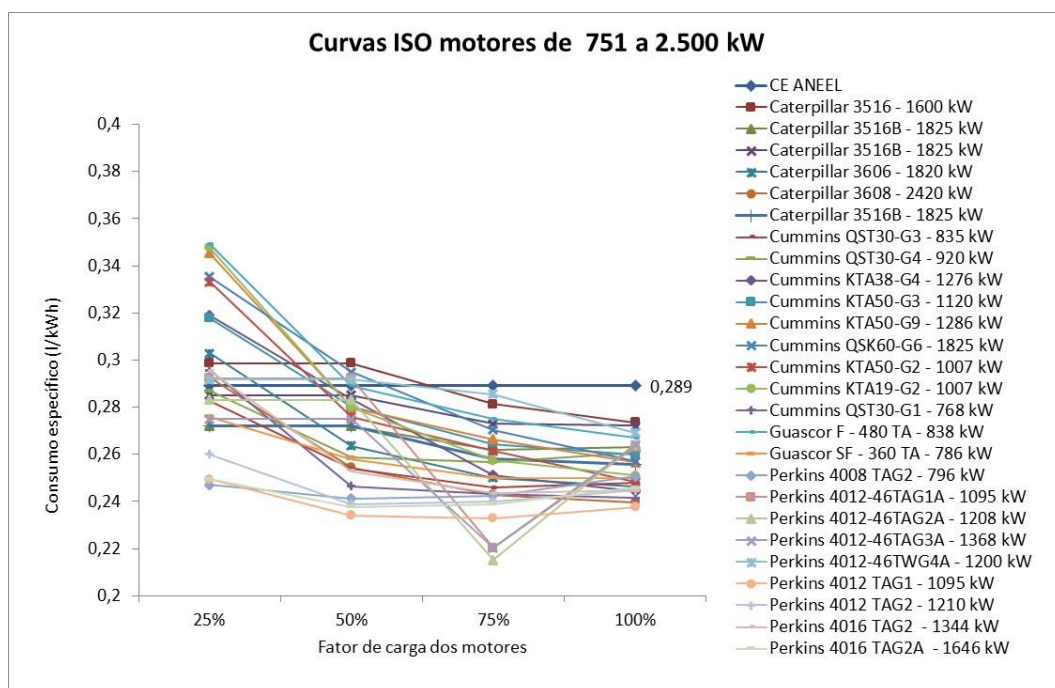


Figura 3-12 Curvas ISO MCI de 751 a 2.500 kW

Fonte: Baseado em Caterpillar (2015), Cummins (2015), Guascor (2015) e Perkins (2014)

### 3.4.6 Curvas ISO Motores de 2.501 a 10.000 kW

Da mesma forma como aconteceu nas outras faixas de potência, a Figura 3-13 apresenta os modelos do fabricante Caterpillar que são os únicos encontrados para motores deste porte nos Sistemas Isolados.

Todos os motores conseguem gerar energia com consumo específico abaixo do limite de 0,283 L/kWh estabelecido para esta faixa de potência.

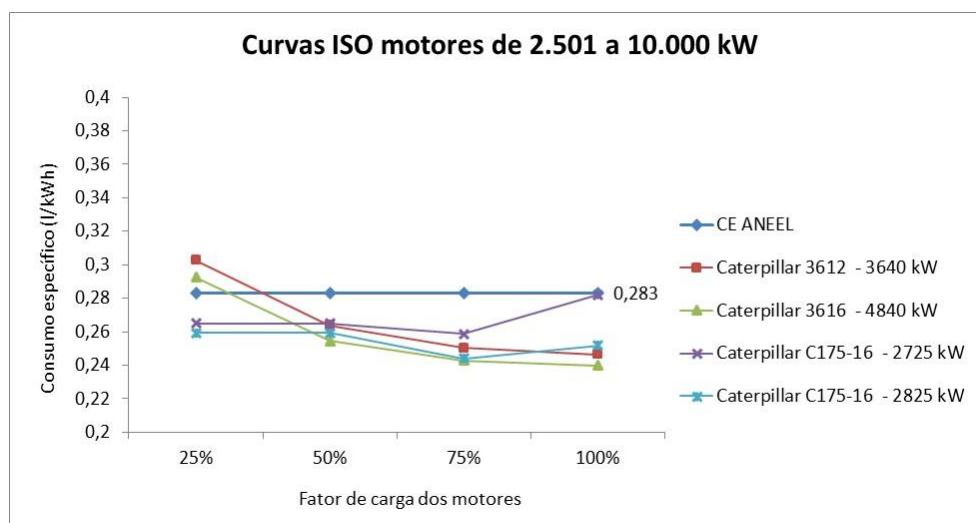


Figura 3-13 Curvas ISO MCI de 2.501 a 10.000 kW

Fonte: Baseado em Caterpillar (2015)

### 3.4.7 Curvas ISO Motores de 10.001 a 20.000 kW

Para esta faixa de potência, aparece somente o fabricante Wärtsilä, com apenas 4 unidades geradoras na usina de Macapá – AP. Estes motores possuem os melhores índices de consumo específico dos motores encontrados nos Sistemas Isolados (Figura 3-14). Durante sua operação, foi possível verificar que o consumo específico mensal foi de 0,198 L/kWh, verificado em dezembro de 2014.

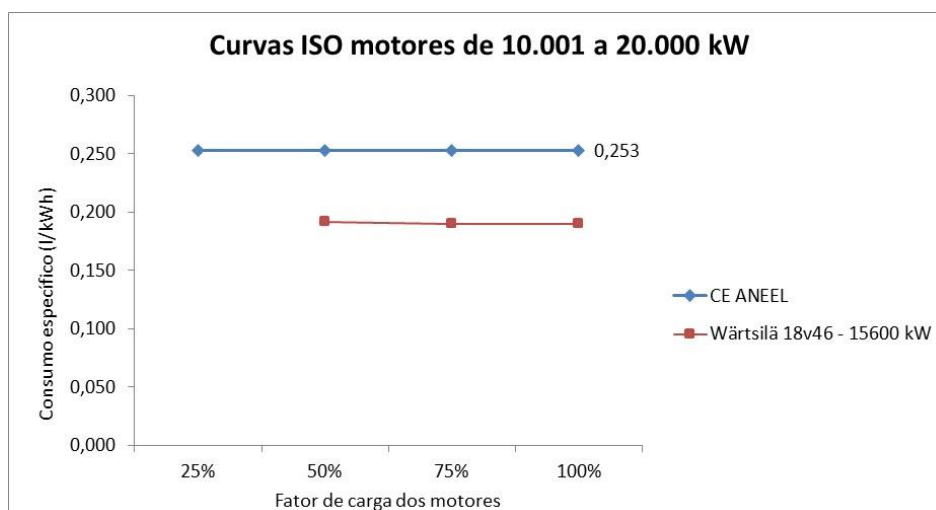


Figura 3-14 Curvas ISO MCI de 10.001 a 20.000 kW

Fonte: Baseado em Wärtsilä (2015)

As curvas ISO dos motores de todas as faixas apresentadas estão dentro dos limites de consumo específico previstos, ou seja, indicando que os motores apresentam consumo específico abaixo do limite imposto pela legislação quando analisados individualmente.

Diante deste resultado, permaneceu a dúvida do motivo de apenas 20,5% das usinas estarem operando com consumo específico dentro dos limites ao se analisarem os dados mensais de operação. Deste modo, a seguir é feito um diagnóstico das usinas analisando a distribuição dos motores que compõem suas plantas.

### **3.5 Diagnóstico da Distribuição das UTE e MCI**

Assim como efetuado com os modelos de motores para cada faixa de potência de acordo com as suas curvas ISO, agora será analisado a distribuição das usinas termelétricas e seus motores nos Sistemas Isolados.

As Figura 3-15 e Figura 3-16 são complementares e ajudam a entender melhor as características dos Sistemas Isolados Brasileiro.

Na Figura 3-15, é possível observar que a maior concentração de usinas ocorre com potência instalada menor que 100 kW. Nesta faixa de potência se encontram as comunidades indígenas, malocas e comunidades muito pequenas, em grande parte localizadas nas margens dos rios do Amazonas, por isto chamadas de comunidades ribeirinhas.

Já nas usinas de 100 a 1.000 kW tem-se os vilarejos das comunidades isoladas com infraestruturas modestas nas casas, ruas sem calçamento e baixa demanda de energia elétrica.

Para as usinas de 1.000 a 10.000 kW encontram-se as cidades típicas da região Norte, que possuem características geralmente próximas das encontradas nas cidades pequenas no interior dos estados do Sudeste, com serviços públicos, escolas até o segundo grau e cursos técnicos e hospitais. A carga de energia requerida, nos Sistemas Isolados, considerando tanto o consumo quanto as perdas de energia, registrou, no acumulado dos últimos 12 meses até março de 2014, um montante de 3.218 GWh, superando a carga verificada no ano anterior em 6%, ressaltando que estes números refere m-se ao Sistemas Isolados excluindo-se Manaus segundo CTM/GTON(2014).

O crescimento nas cidades nesta faixa de potência é limitado geralmente apenas pela quantidade de energia disponível, apresentando demanda reprimida natural. Por exemplo, no estado de Rondônia, até o ano 2008, não havia crescimento significativo da capital Porto Velho e nas principais cidades como Ji-Paraná, Ariquemes e Cacoal, apesar do potencial (agronegócio e mercado consumidor forte na região), pois a geração de energia era limitada. A partir de 2008, com a interligação destas cidades, entre outras, ao Sistema Interligado Nacional, observou-se um rápido crescimento das mesmas devido à maior disponibilidade de energia.

As usinas maiores que 10.000 kW estão instaladas nas cidades com grande potencial de interligação

ao Sistema Interligado Nacional por já apresentarem demanda de energia suficiente para tornar economicamente atrativas as interligações devido ao retorno do investimento para se levar as linhas de transmissão até a localidade. Sabe-se que cada caso deve ser analisado com detalhes; esta situação é observada ao longo dos últimos anos acompanhando o histórico de cidades que foram interligadas nos Sistemas Isolados.

Como referência da quantidade de pessoas atendidas nas usinas termelétricas nesta faixa de potência, segundo a Dresser-Rand (2014) uma usina com 20.000 kW instalados e com demanda de 12.000 kW, supre em média uma cidade com 40.000 habitantes.

Ainda, na Figura 3-15 é possível identificar a faixa que apresenta a maior quantidade de usinas, que é a faixa de 0 a 100 kW e 2500 a 5000 kW de potência instalada na usina. Esta situação indica que, para as alternativas de redução do consumo de diesel, deve se ter em mente que as soluções, sempre que possível, devem atender a estas demandas para que possam ser implantadas em um maior número de usinas nos Sistemas Isolados.

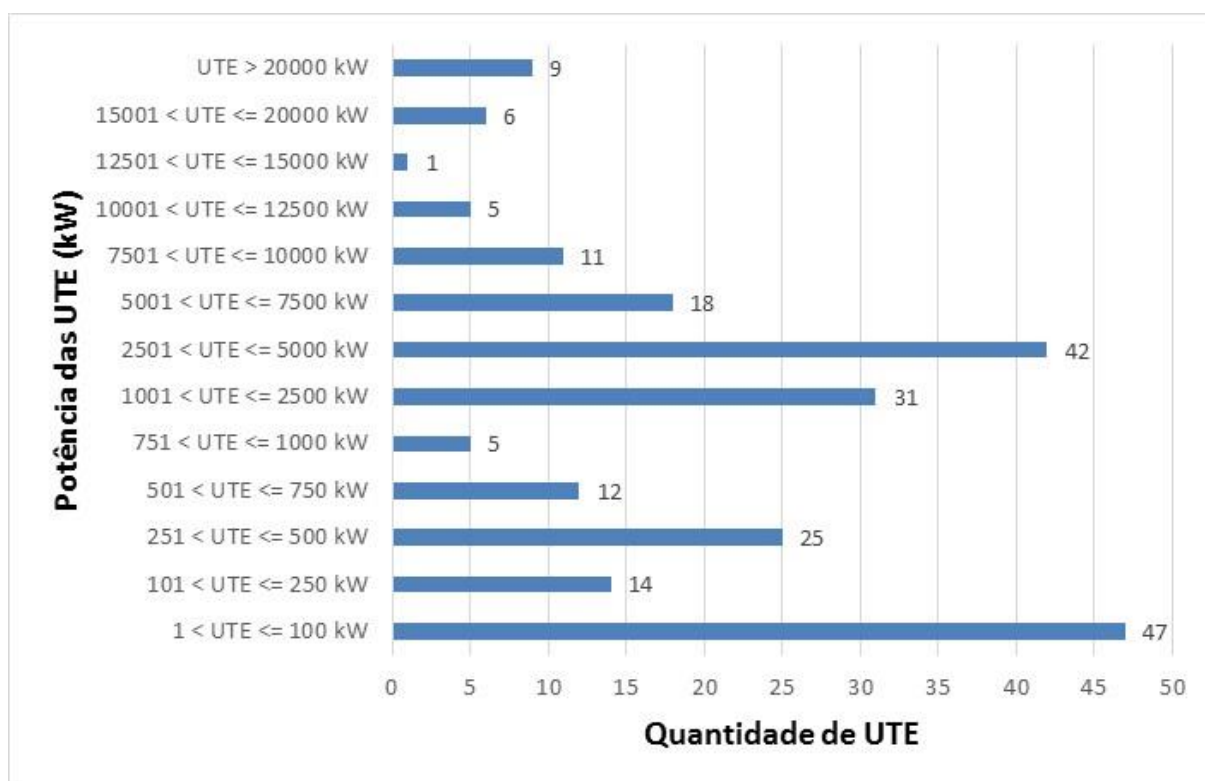


Figura 3-15 Quantitativo de UTE por potência

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do PO Eletrobras (2015)

Os Sistemas Isolados possuem atualmente 1056 MCI, sendo que sua distribuição é apresentada na Figura 3-16.

Com relação à distribuição dos MCI de acordo com sua potência, é possível destacar tanto aspectos positivos quanto negativos. Se por um lado, o uso de vários MCI de menor potência em uma usina

melhora o fator de carregamento, a disponibilidade dos motores e a facilidade na manutenção, por outro, há um consumo de combustível maior em relação ao uso de motores maiores, tendo em vista que motores de potência maior apresentam consumo específico menor.

As unidades geradoras com potência de 1.000 a 2.500 kW são os modelos mais utilizados nas usinas termelétricas, com 416 MCI presentes nos Sistemas Isolados.

Com esta distribuição dos motores nas usinas, é possível identificar que, apesar dos motores individualmente conseguirem um consumo específico abaixo dos limites da legislação, conforme foi descrito em todo o item 3.4, observa-se que os motores adotados pelas usinas formam um conjunto constituído por motores de potência baixa que não conseguem atender os limites de consumo específico e, por isto que apenas 20,5% das usinas conseguem gerar energia com a eficiência exigida.

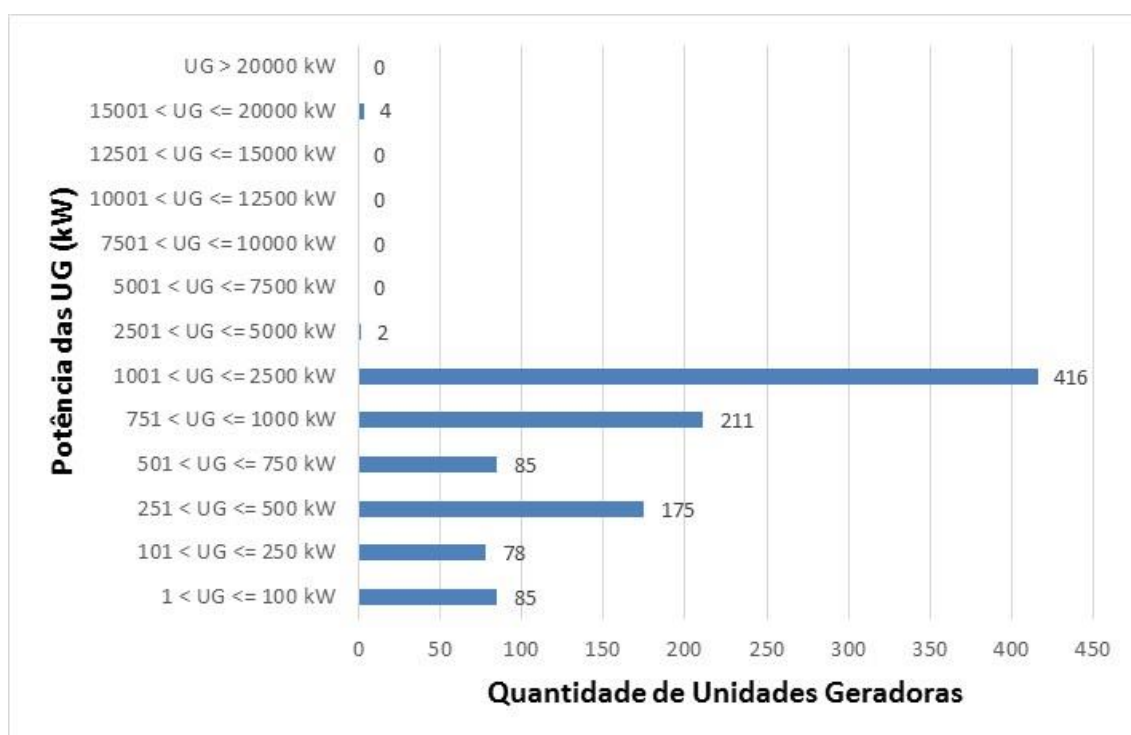


Figura 3-16 Quantitativo de unidades UG potência

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do PO Eletrobras (2015)

Diante deste contexto, e aprofundando ainda mais as pesquisas de diagnóstico das usinas nos Sistemas Isolados, a Figura 3-17 apresenta o quantitativo de unidades geradoras por usina, de acordo com a potência instalada, apresentando as seguintes características:

- Usinas < 100 kW em geral possuem apenas 1 unidade geradora instalada. Esta é a condição geralmente encontrada nas comunidades indígenas, onde o fornecimento de energia durante as 24h do dia e interrupção de 2 a 4h para manutenção, tais como troca de óleo

lubrificante, filtros de óleo e ar, limpeza dos radiadores, conforme programa de manutenção de vários fabricantes, em especial da Cummins;

- Usinas de 100 a 1.000 kW, possuem em média 3 MCI operando em paralelo, com fator de carregamento variando de 50% a 100% devido às demandas das localidades (VAT, 2014);
- Usinas de 1.000 a 10.000 kW possuem uma média de 5 MCI;
- Finalmente, nas usinas > 10.000 kW, possuem uma média de 17 MCI por usina.

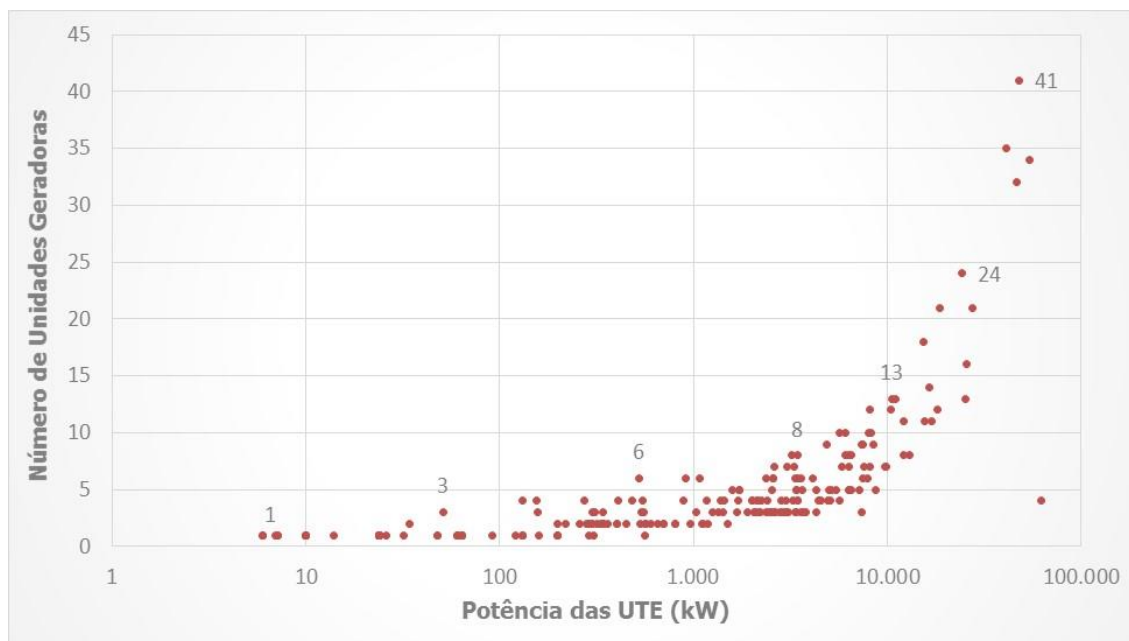


Figura 3-17 Unidades geradoras por UTE

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do PO Eletrobras (2015)

A escala logarítmica nas Figura 3-17, Figura 3-18 e Figura 3-19 foram adotadas para que fosse possível visualizar a distribuição dos pontos, caso não atualizasse esta escala os dados ficariam agrupados dificultando a interpretação.

As potências médias das unidades geradoras são apresentadas na Figura 3-18, onde observa-se que, para usinas com potência baixa, como por exemplo 10 a 100 kW, a potência do motor é próxima à potência da usina. Já para usinas acima de 1.000 kW, observa-se grande concentração de motores com potência em torno de 1000 kW, corroborando com as análises anteriores quanto à distribuição dos motores nas usinas dos Sistemas Isolados.

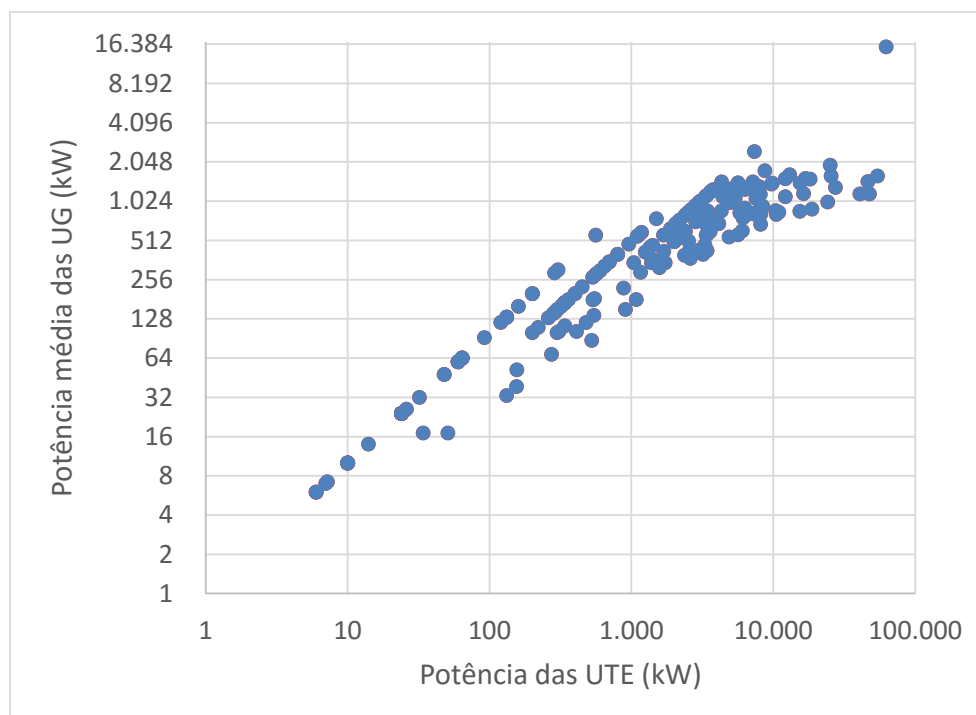


Figura 3-18 Potência média das unidades geradoras

Fonte: Baseado nos dados do PO Eletrobras (2015)

A partir da potência média das unidades geradoras, foi possível traçar o perfil de consumo específico das usinas, baseados nos limites de consumo específico regulamentados pela ANEEL comparando-os com as curvas ISO das unidades geradoras média de cada usina (Figura 3-19).

Considerando o consumo específico da unidade geradora média de cada UTE como sendo o consumo específico ótimo esperado, tendo em vista que nos dados levantados em campo verificam-se valores um pouco maiores, pois conforme já mencionado nas curvas ISO são uma referência de consumo específico fornecido pelos fabricantes em condições controladas (item 3.4), foi possível identificar os cenários atualmente encontrados nas usinas.

A partir das UTE com potência acima de 250 kW, observa-se que os limites de consumo específico das unidades geradoras médias se aproximam dos limites ANEEL e após 20.000 kW este valor ultrapassa o limite de consumo específico, o qual passa a ser ainda mais restritivo.

Para o caso das UTE entre 250 kW e 20.000 kW, situação que engloba 69,3% das usinas, são observados valores de consumo específico muito próximos dos limites da legislação, mas como é uma referência de condições ótimas, estes valores na prática podem ultrapassar os limites da legislação, fato que pode explicar a condição real encontrada nos sistemas isolados, onde 80% não conseguem gerar energia com consumo específico dentro dos limites da legislação, conforme foi apresentado na Figura 3-3.

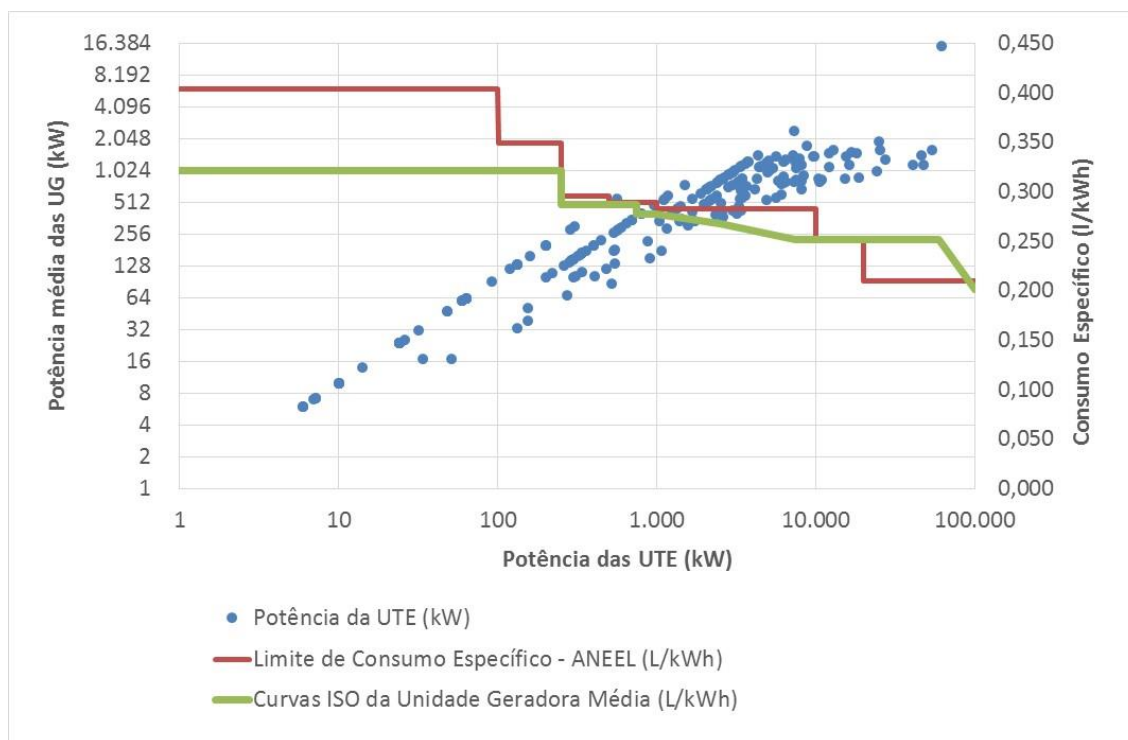


Figura 3-19 Comparação entre Limite de consumo específico Aneel e unidade geradora média

Fonte: Baseado nos dados do PO Eletrobras (2015) e REN nº 427 ANEEL (2011)

Em suma, apesar dos motores, individualmente, possuírem um consumo específico dentro dos limites máximos estabelecidos para sua potência, as usinas apresentam, em sua maioria, consumo específico acima do limite quando comparados à potência média dos motores empregados nas usinas. Esta situação é corroborada com os dados reais de consumo de combustível, onde se verifica que aproximadamente 80 % das usinas estão com baixa eficiência (Figura 3-3).

Dentro deste contexto, a aplicação de tecnologias de geração nas usinas que possam reduzir o consumo de combustível nestas usinas é uma boa opção. Diante disto, será apresentado a seguir o potencial de redução de combustível para as usinas dos Sistemas Isolados, divididos em 4 faixas de potência, agrupando as usinas com características semelhantes.

### 3.6 Potencial de Redução do Consumo de Combustível

O objetivo geral deste item é apresentar o potencial de redução do consumo de diesel nas usinas termelétricas de acordo com a potência instalada, através de dados reais de consumo de combustível, geração e potência instalada da usina disponibilizados no site da Eletrobras (AEC, 2014).

A metodologia consiste em calcular a usina média para cada faixa de potência, considerando o desvio padrão das potências instaladas; em seguida; calcular o potencial de redução de consumo de combustível da usina até que ela possua consumo específico dentro dos limites de consumo

definidos pela ANEEL.

Nas Figura 3-20, Figura 3-21, Figura 3-22 e Figura 3-23 são apresentadas as quantidades de combustível não reembolsado (glosado) devido as usinas apresentarem consumo específico acima do limite permitido. A linha azul refere-se ao limite definido para a usina e a linha laranja o consumo específico realizado, ambas as linhas com escala no eixo secundário à direita.

### 3.6.1 UTE Típica com Potência $\leq 1$ MW

A Figura 3-20 apresenta em ordem decrescente as usinas dos Sistemas Isolados de acordo com a usina que teve a maior quantidade de combustível não reembolsável no período de um mês para esta faixa de potência, indicando as usinas com maior potencial de redução para implementação de alternativas de redução de consumo de combustível por apresentarem grandes desperdícios.

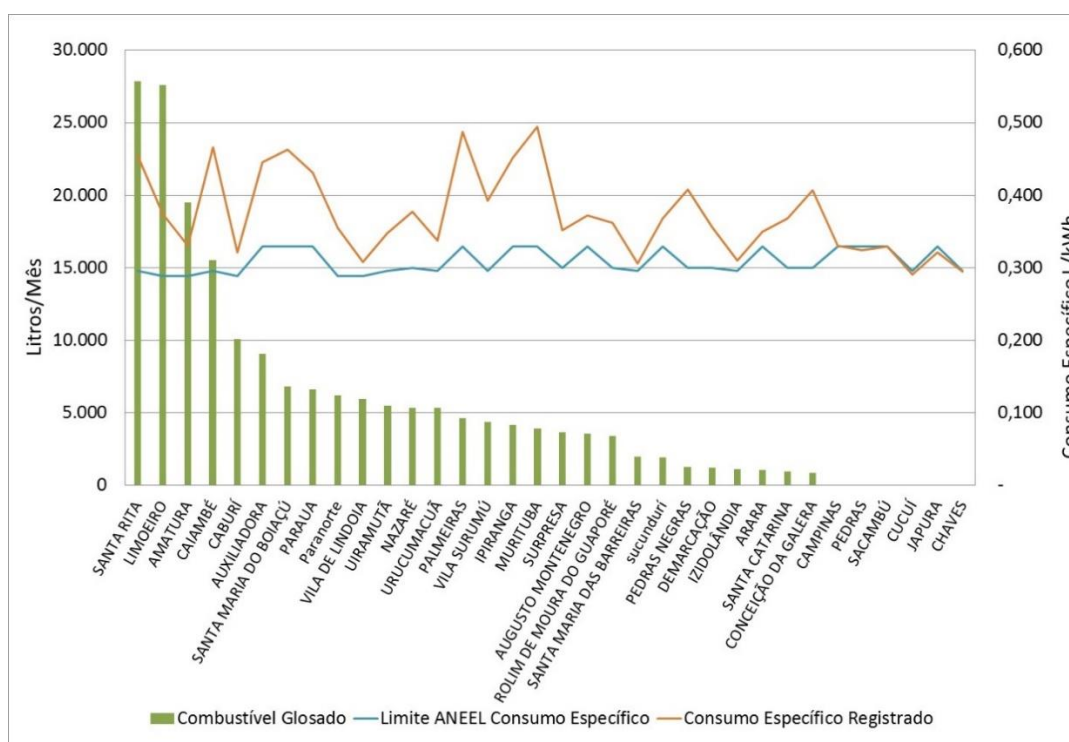


Figura 3-20 Potencial de redução de combustível (UTE  $\leq 1$  MW)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

A legislação dos Sistemas Isolados possibilita, conforme mencionado no item 2.4.6, a sub-rogação de até 75 % do valor do investimento de projeto que venha a substituir total ou parcialmente o consumo de combustíveis fósseis, sendo que o valor pago mensalmente consiste no custo do combustível evitado.

Deste modo, a Tabela 3-4 apresenta a usina média desta faixa de potência com o potencial de redução de combustível e, conseqüentemente do valor a ser recebido mensal e anualmente devido a esta redução até que se atinja 75% do projeto. Estes dados são baseados nos dados utilizados

para a elaboração da Figura 3-20.

Por exemplo, se um projeto custar em torno de 175.000 reais, em pouco menos de um ano 75% deste valor é recuperado

Tabela 3-4 UTE típica para potência  $\leq 1$  MW

| Usina Termelétrica Típica - (UTE $\leq 1$ MW) |         |
|-----------------------------------------------|---------|
| Potência média (kW)                           | 450     |
| Média diesel não reembolsado (L/mês)          | 5.577   |
| Média diesel não reembolsado (L/ano)          | 66.925  |
| Custo com diesel não reembolsado (R\$/ano)*   | 175.544 |

\* preço diesel: 2,623 R\$/Litro (maio 2015)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

### 3.6.2 UTE Típica com Potência de $1 < a \leq 2,5$ MW

Com as mesmas características a Figura 3-21 apresenta o potencial de redução de combustível para usinas de 1 a 2,5 MW. Observa-se que, mesmo que o limite de consumo específico seja apenas um pouco excedido, a quantidade de combustível não reembolsável é significativa, conforme Tabela 3-5.

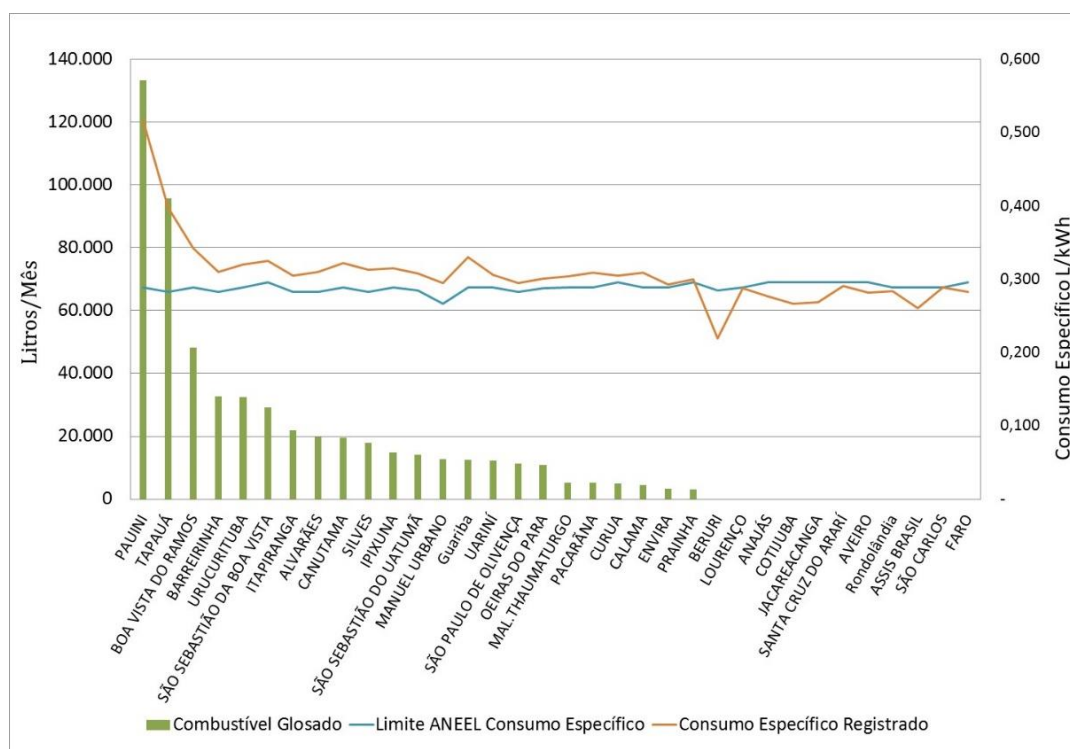


Figura 3-21 Potencial de redução de combustível (UTE de  $1 < a \leq 2,5$  MW)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

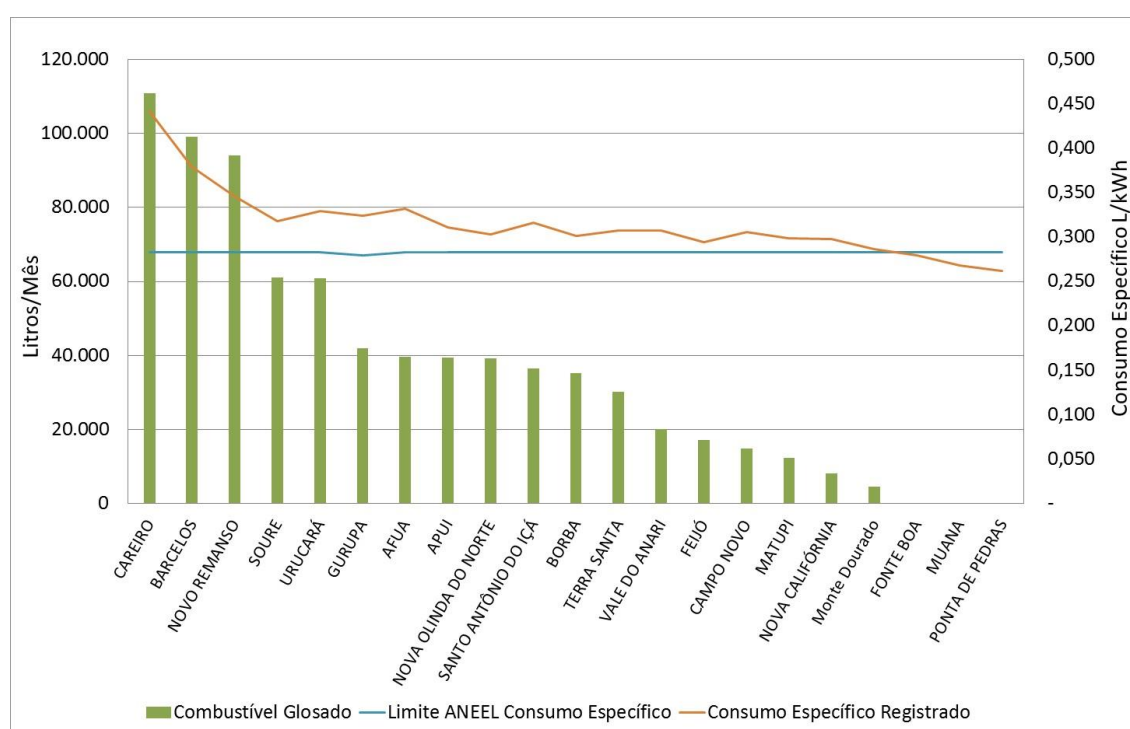
Tabela 3-5 UTE típica para potência de  $1 < a \leq 2,5$  MW

| Usina Termelétrica Típica - (UTE $1 < a \leq 2,5$ MW) |         |
|-------------------------------------------------------|---------|
| Potência média (kW)                                   | 1.774   |
| Média diesel não reembolsado (L/mês)                  | 16.626  |
| Média diesel não reembolsado (L/ano)                  | 199.510 |
| Custo com diesel não reembolsado (R\$/ano)*           | 523.314 |

\* preço diesel: 2,623 R\$/Litro (maio 2015)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

### 3.6.3 UTE Típica com Potência de $2,5 < a \leq 5$ MW

Figura 3-22 Potencial de redução de combustível (UTE de  $2,5 < a \leq 5$  MW)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

Tabela 3-6 UTE típica para potência de  $2,5 < a \leq 5$  MW

| Usina Termelétrica Típica - (UTE $2,5 < a \leq 5$ MW) |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| Potência média (kW)                                   | 3.335     |
| Média diesel não reembolsado (L/mês)                  | 36.448    |
| Média diesel não reembolsado (L/ano)                  | 437.378   |
| Custo com diesel não reembolsado (R\$/ano)*           | 1.147.242 |

\* preço diesel: 2,623 R\$/Litro (maio 2015)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

### 3.6.4 UTE Típica com Potência > 5MW

Por fim é apresentada a Figura 3-22. Observa-se que para usinas com potência maior que 5 MW a quantidade de usinas com potencial de redução de combustível é menor do que nas situações anteriores.

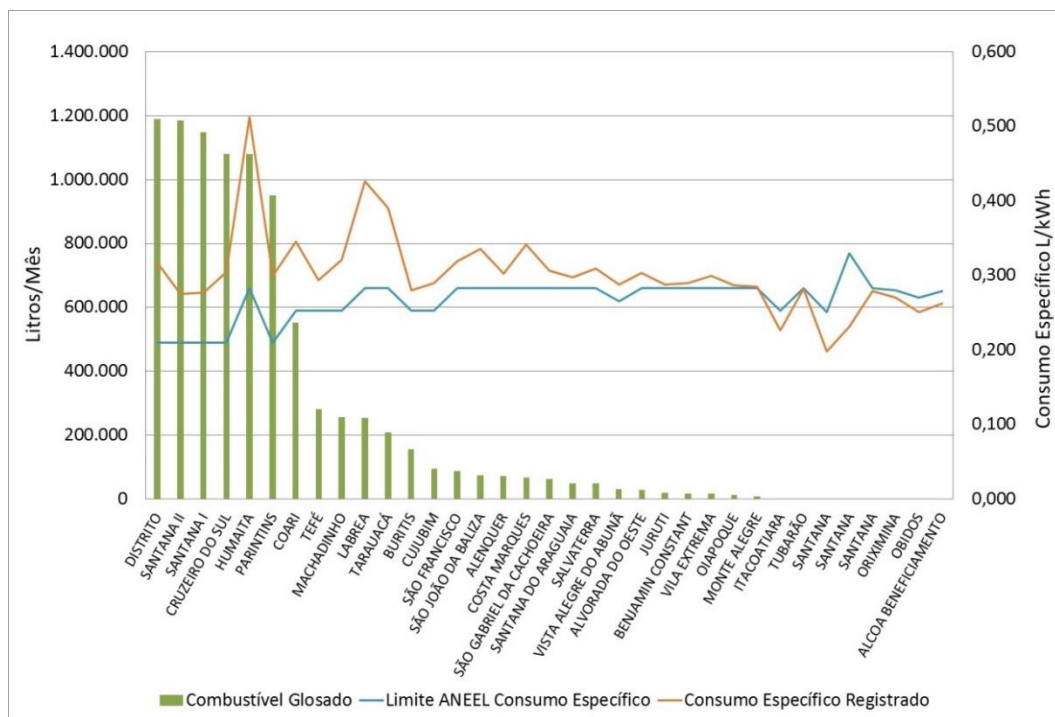


Figura 3-23 Eficiência das UTE (Potência instalada > 5 MW)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

A usina típica para usinas maiores que 5MW é apresentada na Tabela 3-7, onde a média para usinas maiores, que são as 7 primeiras com grande quantidade de combustível não reembolsável.

Tabela 3-7 UTE típica para potência > 5 MW

| Usina Termelétrica Típica - (UTE > 5 MW)    |                  |
|---------------------------------------------|------------------|
| Potência média (kW)                         | <b>18.692</b>    |
| Desvio padrão (kW)                          | 5.637            |
| Limite Superior (kW)                        | 24.328           |
| Limite Inferior (kW)                        | 13.055           |
| Média diesel não reembolsado (L/mês)        | <b>257.979</b>   |
| Média diesel não reembolsado (L/ano)        | 3.095.743        |
| Custo com diesel não reembolsado (R\$/ano)* | <b>8.120.133</b> |

\* preço diesel: 2,623 R\$/Litro (maio 2015)

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do SCD ELB (2014)

Considerando o diagnóstico realizado, para as usinas termelétricas dos Sistemas Isolados, o capítulo seguinte abordará a aplicação de alternativas para redução do consumo de combustível. Para isto,

será utilizada a recuperação do calor dos gases de exaustão dos MCI de uma usina tomada como estudo de caso, de forma a incorporar um Ciclo Orgânico de Rankine –ORC, e também o uso de painéis fotovoltaicos.

## **4 ESTUDO DE CASO – PROPOSTA DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA A USINA TERMELÉTRICA DE JACAREACANGA – PA**

O estudo de caso foi realizado na usina termelétrica de Jacareacanga, localizada no município de Jacareacanga –PA, às margens do rio Tapajós.

As características da localidade e da usina são descritas a seguir. Na sequência, são apresentados os cenários considerados para proposta de redução do consumo de combustível da usina. Este estudo de caso pretende, além do objetivo de aplicação das propostas de redução do consumo de combustível, ser uma sugestão replicável para as outras usinas dos Sistemas Isolados, tendo em vista que apresentam consumo específico mensal acima do previsto na legislação.

### **4.1 O Sistema Isolado de Jacareacanga**

#### **4.1.1 Localização**

A localidade de Jacareacanga encontra-se no estado do Pará (Figura 4-1). Para se chegar até lá normalmente percorre-se de carro, através da estrada Transamazônica, 400 km de estradas vicinais não asfaltadas distantes da cidade mais próxima (município vizinho de Itaituba) ou através de avião fretado, pois não existe linha comercial no local.

A bacia do rio Tapajós, a qual engloba a cidade de Jacareacanga, é atualmente um lugar de grande interesse nacional por ser um dos últimos grandes aproveitamentos hidrelétricos ainda não explorados no Brasil.

Encontra-se em fase de estudos ambientais e preparação para leilão as usinas hidrelétricas do Complexo Tapajós, que serão formados pelas usinas hidrelétricas de São Luiz do Tapajós, em Itaituba, Jatobá, perto de Jacareacanga, ambas no rio Tapajós, além das usinas hidrelétricas de cachoeira do Caí, Jamanxim e Cachoeira dos Patos, localizadas no rio Jamanxim. O complexo formado por estas 5 usinas hidrelétricas prevê uma potência instalada de 10.682 MW (GET, 2014). Com isto, a cidade de Jacareacanga passou a ser um ponto de apoio para as equipes que estão envolvidas neste projeto, com previsão de crescimento de demanda com a chegada da usina hidrelétrica ao seu redor.



Figura 4-1 Mapa do Pará – detalhe para Jacareacanga

Fonte: Guia Net (2014)

#### 4.1.2 Classe de Consumidores

A cidade possui um total de 1.409 clientes cadastrados comercialmente, não existindo grande discrepância entre o número de clientes cadastrados e aqueles atualmente atendidos, conforme verificado *in loco* na unidade de atendimento da distribuidora Centrais Elétricas do Pará (Celpa) durante visita à cidade para levantamento de dados de campo. A Figura 4-2 apresenta a distribuição destes consumidores de acordo com a classe de consumo. Observe que 85% do consumo de energia da localidade é residencial, situação típica encontrada nas comunidades isoladas, não apresentando grandes variações de demanda repentinas, como poderia ocorrer no caso de cidades com serrarias, em que a demanda varia constantemente, pois ao ligarem as serras tem-se grandes variações na demanda.

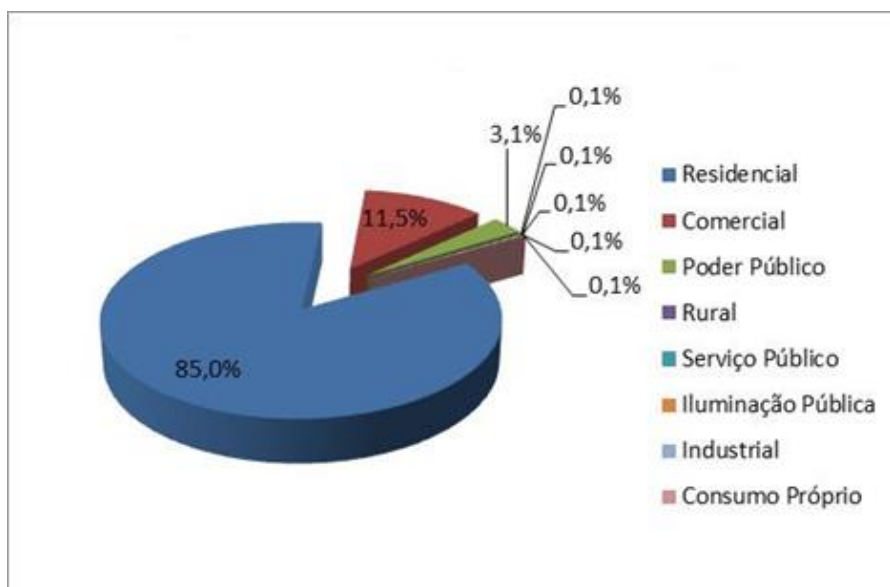


Figura 4-2 Consumidores por classe de consumo, elaboração própria com base em dados coletados durante inspeção na localidade (2013)

Fonte: Adaptado CELPA (2013)

### 4.1.3 Vista Aérea do Município

A Figura 4-3 apresenta a vista aérea do centro da cidade de Jacareacanga, observe que a cidade não é muito extensa já apresentando a mata no seu entorno logo perto do centro da cidade.



Figura 4-3 Vista aérea do centro de Jacareacanga

Logo após o sobrevoo sobre a cidade observa-se a densa floresta Amazônica cortada pelo rio Tapajós, conforme Figura 4-4, demonstrando a grande dificuldade de se interligar uma cidade como esta.



Figura 4-4 Rio Tapajós

#### 4.1.4 Configuração dos MCI da Usina Termelétrica de Jacareacanga

O parque termelétrico de Jacareacanga possui 4 unidades geradoras cabinadas (canopy) do fabricante Cummins, modelo QSX15-G9 de 455 kW, conforme apresentado na Tabela 4-1. Estes motores possuem governadores eletrônicos que operam no modo Carga Compartilhada (load sharing), o qual é o sistema mais utilizado atualmente na operação de MCI em paralelo para geração de energia. Deste modo, a carga requerida pela localidade é dividida proporcionalmente à potência e quantidade dos MCI. No caso da usina de Jacareacanga, como os 4 motores são iguais, a carga requerida é dividida igualmente entre os motores em operação.

Cada motor fornece até 455 kW de potência, sendo que durante a operação, assim que a demanda ultrapassa 90% deste valor ou seja 409,5 kW, é adicionado outro motor para garantir a estabilidade da operação, aliviando a carga do conjunto de motores em operação e garantindo a estabilidade do sistema.

Tabela 4-1 Configuração do Parque termelétrico

| UG           | FABRICANTE |          | MODELO<br>MOTOR | GERADOR       |               | POTÊNCIA     |             |
|--------------|------------|----------|-----------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
|              | MOTOR      | GERADOR  |                 | (kVA)<br>NOM. | ROTAÇÃO (rpm) | (kW)<br>NOM. | DISP.       |
| UG-01        | Cummins    | Stamford | QSX15-G9        | 515           | 1.800         | 455          | 455         |
| UG-02        | Cummins    | Stamford | QSX15-G9        | 515           | 1.800         | 455          | 455         |
| UG-03        | Cummins    | Stamford | QSX15-G9        | 515           | 1.800         | 455          | 455         |
| UG-04        | Cummins    | Stamford | QSX15-G9        | 515           | 1.800         | 455          | 455         |
| <b>TOTAL</b> | -          | -        | -               | <b>2.060</b>  | -             | <b>1.800</b> | <b>1800</b> |

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados do PO Eletrobras (2015).

A Figura 4-5 mostra a casa de máquinas da usina com as unidades geradoras descritas anteriormente.



Figura 4-5 Unidades geradoras de Jacareacanga

Fonte: Centrais Elétricas do Pará (2013)

Segundo o documento “Instruções para Elaboração e Apresentação de Projetos Alternativos aos Projetos de Referência nos Sistemas Isolados– (EPE)”, a usina deve possuir unidades geradoras suficientes para atender a demanda total da localidade, mesmo que existam fontes complementares. Este fato deve ser levado em conta durante a elaboração dos projetos de geração (PASI-EPE, 2014). Deste modo, mesmo com a instalação de fontes alternativas, o somatório das potências das unidades geradoras a diesel deve suprir a demanda total da localidade, para que caso haja um problema na geração alternativa, a demanda da localidade possa ser atendida pelos grupos geradores.

#### **4.1.5 Consumo de Combustível e Geração de Energia na Usina**

Os dados de consumo de diesel e a geração registrados mês a mês ao longo do ano de 2014 estão na Tabela 4-2, conforme disponibilizado pela Eletrobras no Sistema de Coleta de Dados (SCD, 2014).

Para a avaliação dos cenários propostos neste capítulo, foi adotada como geração atual da usina a média anual, tendo em vista que não há grandes variações entre os valores mensais informados.

Tabela 4-2 Consumo de diesel na usina de Jacareacanga

| 2014  | Consumo de Combustível (l) | Geração de Energia (kWh) | Consumo Específico l/kWh | Consumo Diário (l) | Geracao Diária (kWh) |
|-------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Dez   | 169.253                    | 616.010                  | 0,275                    | 5.642              | 20.534               |
| Nov   | 164.619                    | 586.502                  | 0,281                    | 5.487              | 19.550               |
| Out   | 177.507                    | 638.765                  | 0,278                    | 5.917              | 21.292               |
| Set   | 176.151                    | 631.307                  | 0,279                    | 5.872              | 21.044               |
| Ago   | 180.145                    | 633.128                  | 0,285                    | 6.005              | 21.104               |
| Jul   | 171.062                    | 612.136                  | 0,279                    | 5.702              | 20.405               |
| Jun   | 174.767                    | 618.201                  | 0,283                    | 5.826              | 20.607               |
| Mai   | 167.511                    | 595.355                  | 0,281                    | 5.584              | 19.845               |
| Abr   | 153.062                    | 542.971                  | 0,282                    | 5.102              | 18.099               |
| Mar   | 162.230                    | 573.707                  | 0,283                    | 5.408              | 19.124               |
| Fev   | 144.428                    | 507.559                  | 0,285                    | 4.814              | 16.919               |
| Jan   | 156.817                    | 545.368                  | 0,288                    | 5.227              | 18.179               |
| Média | 166.463                    | 591.751                  | 0,281                    | 5.549              | 19.725               |

Fonte: Portal Eletrobras (2014)

#### 4.1.6 Curva de Carga Típica da Usina

Os dados da memória de massa da usina foram levantados em campo através do analisador de rede MARH 21 da RMS (Figura 4-6) durante visita à usina, o qual, para um tempo definido, grava as tensões, correntes, potências ativas e reativas em sua memória.

Durante o levantamento da curva de carga, foi realizada a medição de 24h ininterruptas de um dia típico de demanda de energia na localidade, sendo registradas as medições com intervalos de 1 minuto.



Figura 4-6 Aquisição das medidas de demanda - RMS MARH-21

Fonte: RMS Sistemas Eletrônicos (2015)

Através da memória de massa foi possível traçar a curva de carga de um dia típico, conforme apresentado na Figura 4-7.

Tendo em vista que no item 4.1.2 descreve-se que 85% dos consumidores são residenciais é possível interpretar a curva de acordo com a demanda da seguinte forma:

- No período da madrugada ao amanhecer – 0 às 7:30h predomina a iluminação pública e residencial, onde observa-se que ao longo da noite, à medida que a população começa a dormir, o consumo cai até chegar o período da manhã, quando se desliga a iluminação pública;
- No período das 7:30h às 11:00h inicia-se o dia com aumento da demanda de escolas, comércio e também pelo consumo residencial e com pequena redução no horário de almoço;
- No período da tarde, a demanda vai aumentando e apresenta recuo no final da tarde por volta das 18:00h, quando as aulas à tarde terminam e também pelo fechamento de alguns estabelecimentos comerciais e repartições públicas;
- No início da noite, a demanda volta a subir com a entrada da iluminação pública e residencial e, ao final da noite, a demanda começa a reduzir após o horário de pico e o ciclo começa novamente.

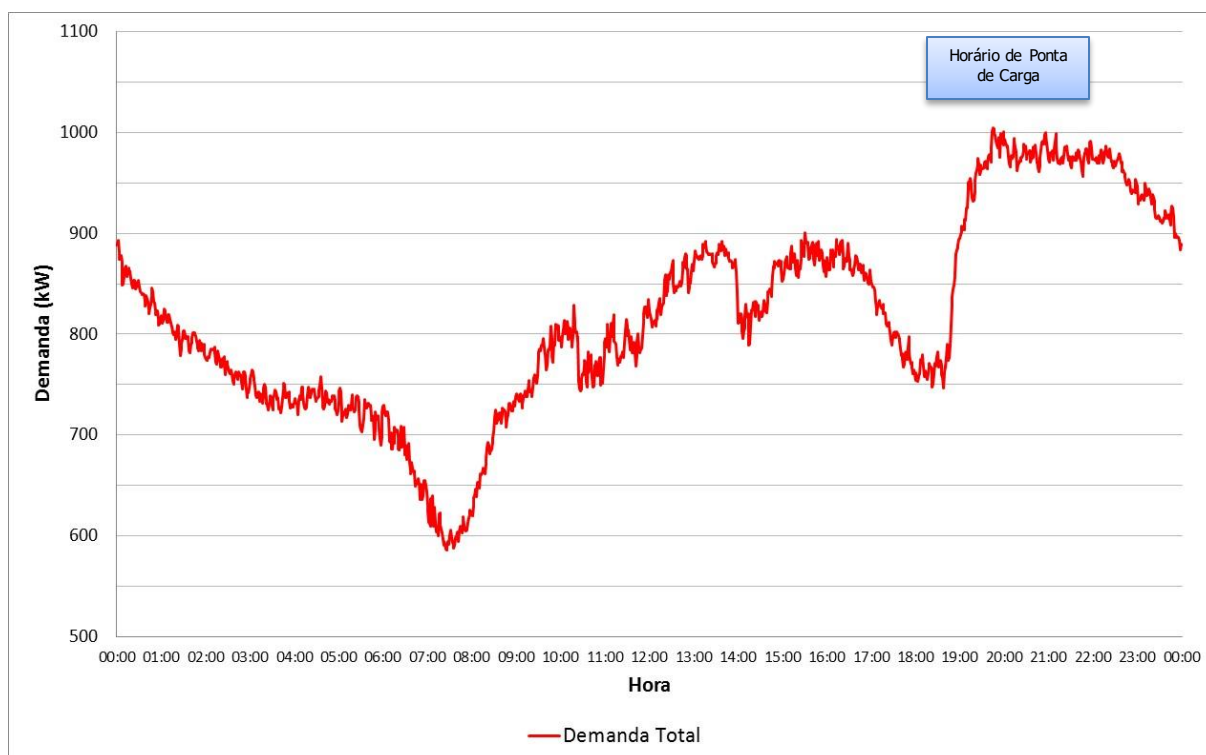


Figura 4-7 Curva de Carga de um dia típico - UTE Jacareacanga

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de campo do MARH-21

De posse da curva de carga de um dia típico, é possível extrapolar estes dados para um mês e, desta forma, utilizá-lo com base de demanda de energia na avaliação das alternativas para redução do consumo de combustível.

Ao se efetuar a comparação da demanda de dia típico extrapolada para o mês e a energia gerada mensal da usina, registrada no Sistema de Coleta de Dados (SCD), verificou-se um valor próximo do medido com uma diferença de apenas 4,5% demonstrando que a curva obtida é representativa para o estudo de caso.

## **4.2 Estudo dos Cenários para Redução do Consumo de Combustível da Usina**

Os cenários a seguir foram desenvolvidos em torno da operação real da usina através dos dados de despacho das unidades geradoras coletados durante visita no local.

O estudo de caso foi realizado em uma usina com baixo consumo específico em relação ao limite ANEEL, apresentando consumo específico médio mensal nas condições atuais de operação de 0,281 L/kWh, o qual está dentro do limite estabelecido pela ANEEL, de 0,289 L/kWh, para usina com potência instalada entre 1.000 a 2.500 kW. Esta condição de boa eficiência é importante no estudo de caso, pois permite avaliar a capacidade de redução do consumo de combustível das opções tecnológicas, para que possam ser replicadas nas outras usinas dos Sistemas Isolados.

### **4.2.1 Consumo de Combustível para os MCI**

A modelagem de consumo de combustível para os MCI segue a mesma metodologia utilizada no software OTSI - Otimização de Sistemas Isolados do CEPEL (OTSI CEPEL, 2009), o qual calcula o despacho ótimo para a UTE de acordo com o parque gerador e a demanda da localidade.

A Figura 4-8 apresenta uma das telas do software OTSI utilizado, onde é possível observar que foram inseridos para a simulação os dados de demanda da usina de Jacareacanga de um dia típico (item 4.1.6).

Buscando aprimorar a simulação dos dados reais, foram inseridos no banco de dados do software OTSI as informações de consumo de combustível e potência do motor Cummins QSX - 15G9 da usina de Jacareacanga.

| Hora do dia | Demanda dia útil (kW) | Hora do dia | Demanda dia útil (kW) |
|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| 1           | 846,45                | 13          | 843,73                |
| 2           | 799,76                | 14          | 877,37                |
| 3           | 766,38                | 15          | 831,78                |
| 4           | 738,82                | 16          | 875,51                |
| 5           | 735,31                | 17          | 871,07                |
| 6           | 722,17                | 18          | 803,27                |
| 7           | 681,83                | 19          | 785,26                |
| 8           | 607,32                | 20          | 959,86                |
| 9           | 688,74                | 21          | 979,53                |
| 10          | 763,82                | 22          | 976,84                |
| 11          | 779,08                | 23          | 966,3                 |
| 12          | 794,2                 | 24          | 921,02                |

Figura 4-8 Tela do software – OTSI

Fonte: CEPEL (2009)

A Figura 4-9 apresenta graficamente as etapas de cálculo da equação que estima o consumo de combustível para o motor avaliado, de acordo com o fator de carga aplicado ao motor. Assim, a Figura 4-9-(a) apresenta o consumo de combustível em (l/h) para 4 patamares de carga, ou seja, 100, 75, 50 e 25% da potência nominal em (kW).

Dividindo o consumo horário pela carga, obtêm-se o consumo específico (L/kWh) para cada um dos patamares de carga, possibilitando traçar a curva de consumo específico característica do motor, conforme informa o fabricante em suas folhas de dados, e apresentadas na Figura 4-9-(b). A Figura 4-9-(c) apresenta os pontos com o consumo informado pelo fabricante e a reta que passa por estes pontos, para que se possa obter o consumo em pontos intermediários através Equação 4.1.

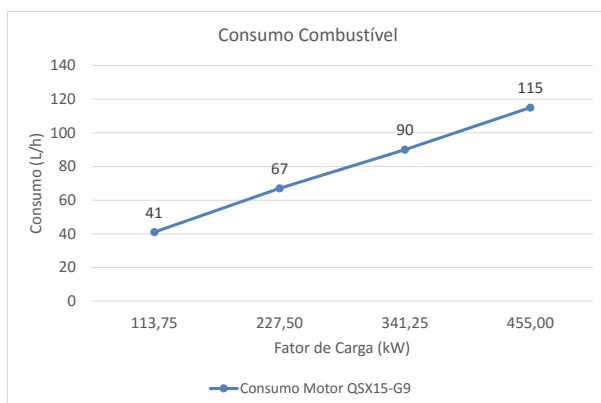
Finalmente, a Figura 4-9-(d) apresenta o resultado da utilização da Equação 4.1 para estimar o consumo onde é possível observar que a curva de consumo específico calculada é próxima da curva apresentada pelo fabricante, apresentando um desvio de 5% apenas para patamares de carga próximo de 25%. Entretanto, este ponto de operação não é utilizado na operação das usinas termelétrica por ser um ponto antieconômico como informa a própria Cummins em seus manuais de operação, não recomendando a operação em patamares inferiores de 30% de carga por apresentar consumo específico elevado.

A Equação 4.1 calcula o consumo de combustível de acordo com a carga do motor. Os parâmetros desta equação foram obtidos a partir dos dados de consumo de combustível informados pelo fabricante para o motor QSX15-G9.

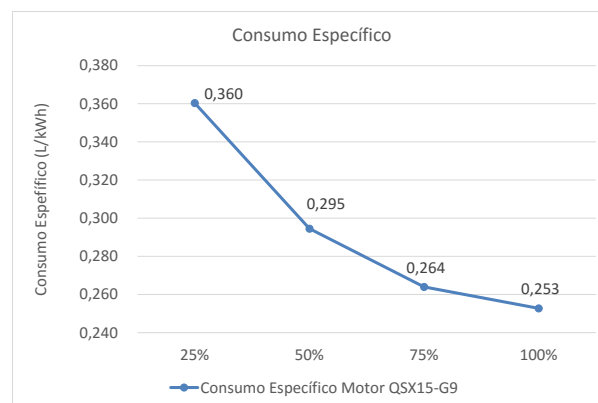
$$\text{Consumo}(L) = 0,211 * X + 19 \quad (4.1)$$

Onde:

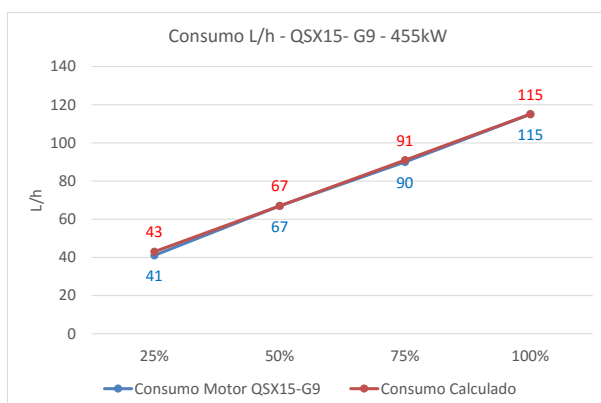
X: Demanda do MCI em kW.



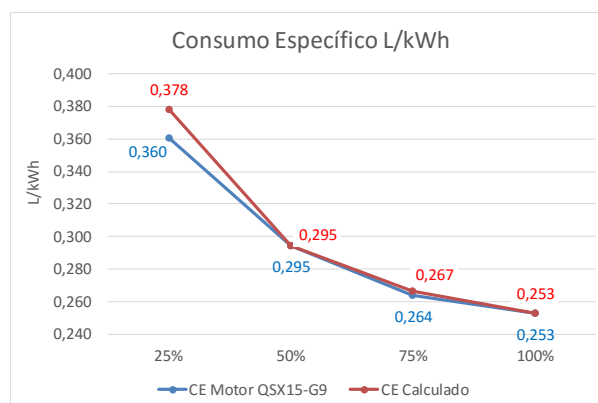
a) Potência x consumo



b) Consumo específico



c) Consumo calculado



d) Consumo específico calculado

Figura 4-9 Cálculo do consumo de combustível para o motor QSX15-G9

Fonte: Elaboração própria baseado em Cepel (2008) e Cummins (2014)

Deste modo, é possível calcular o consumo de combustível, dada a curva de carga da Figura 4.7 juntamente com a Equação 4.1, como prevê a metodologia apresentada pelo CEPEL (2008), e que é utilizada no OTSI conforme o despacho dos MCI.

Assim, foi possível analisar os cenários de alternativas para redução do consumo específico da usina, os quais são apresentados nos próximos itens.

### 4.2.2 Cenário 1 – MCI - Despacho Atual

O Cenário 1 considera as condições atuais de operação de acordo com o despacho das unidades geradoras (UG). Esta condição de operação é o ponto de partida de avaliação da aplicação das alternativas para redução do consumo de combustível e, consequentemente, redução dos custos totais de geração.

As unidades geradoras da usina de Jacareacanga, bem como a maioria das usinas nos Sistemas Isolados, operam no sistema de carga compartilhada (load sharing), dividindo a curva de demanda da localidade igualmente pelo número de MCI em operação no momento de solicitação.

O despacho dos MCI para atender a curva de demanda, atualmente, ocorre segundo a Figura 4-10, onde as barras empilhadas representam os MCI em operação, por base horária, dividindo a demanda pelo número de MCI. Por exemplo, durante a primeira hora de operação, os MCI estão em operação em paralelo para atender uma demanda de 846 kW, divididas igualmente entre eles, ou seja, 282 kW para cada MCI.

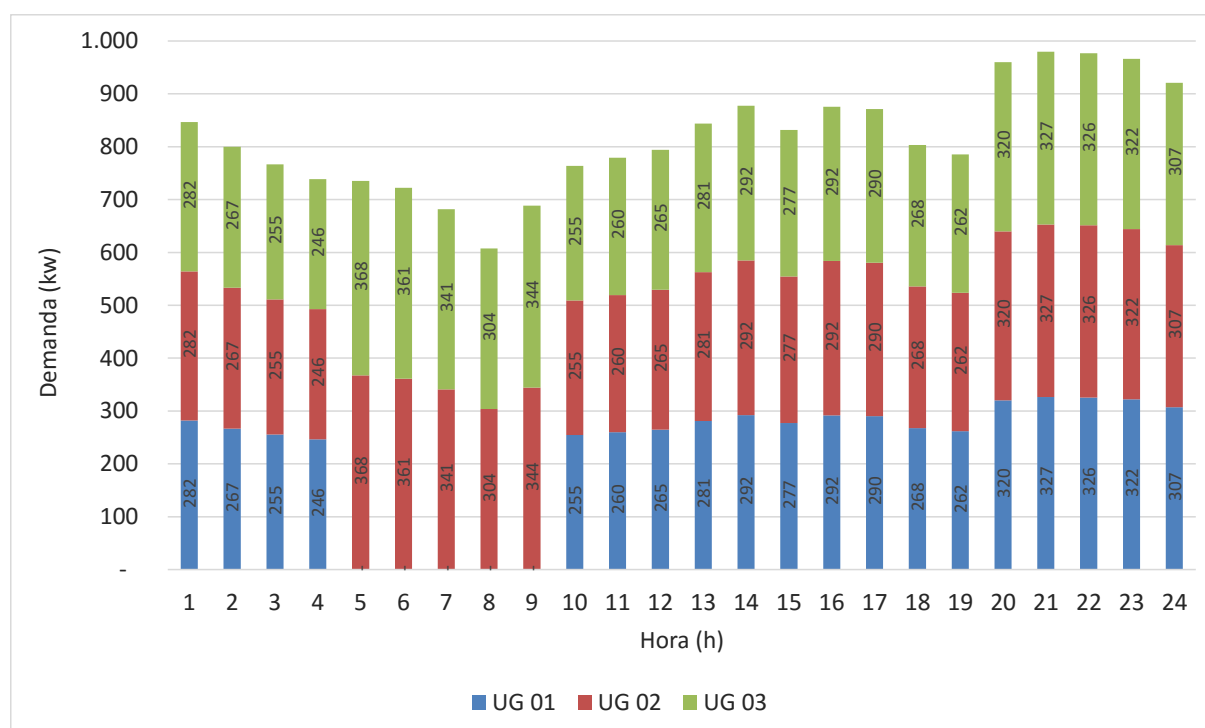


Figura 4-10 Despacho dos MCI (cenário atual)

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de despacho da usina coletados em campo. De acordo com o despacho apresentado na Figura 4-10, foi possível calcular o carregamento dos MCI; no período com somente duas unidades geradoras operando, entre 5 e 9h, o fator de carregamento é maior, e consequentemente diminui-se o consumo específico neste período (Figura 4-11).

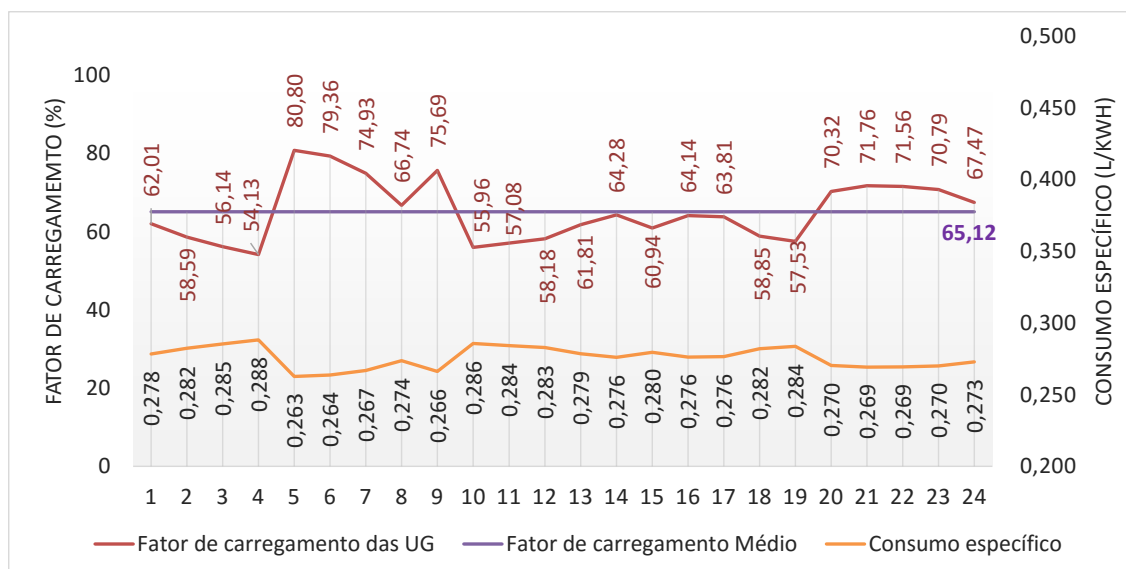


Figura 4-11 Fator de carregamento dos MCI (cenário atual)

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4-3 apresenta o resultado da configuração da usina com o despacho atual, onde o consumo específico mensal calculado é de 0,276 L/kWh. Já o custo total com combustível, segundo a Equação 2.4 é de R\$425.842/mês. Nesta condição, a usina terá o reembolso mensal de R\$312.498/mês, que corresponde à diferença entre o Custo Total de Geração ( $R_{CCG}$ ) e o custo da geração no Ambiente de Contratação Regulada  $ACR_{méd}$ , conforme item 2.4.5.

Para o caso da usina de Jacareacanga, que possui consumo específico abaixo do limite ANEEL de 0,289 L/kWh, o reembolso mensal do custo com combustíveis não sofreu glosa, ou seja, não apresentou quantidade de combustível não reembolsado.

Tabela 4-3 Análise do Cenário 1

| Cenário 1 - MCI - Despacho Atual   |                   |
|------------------------------------|-------------------|
| Geração de Energia                 | 588.462 kWh       |
| Consumo Diesel                     | 162.349 L         |
| Consumo Específico                 | <b>0,276</b>      |
| Custo Combustível                  | 425.842 R\$ (mês) |
| Reembolso Custos Totais de Geração | 312.498 R\$ (mês) |

Fonte: Elaboração própria

### 4.2.3 Cenário 2 – MCI - Despacho Ótimo

O Cenário 2 apresenta os resultados da simulação do despacho ótimo dos MCI realizada no software OTSI – Otimização de Sistemas Isolados e apresentado na Figura 4-12. O objetivo foi elevar o fator de carregamento dos MCI e assim, reduzir, quando possível, o número de UG operando simultaneamente.

Através da mesma metodologia empregada do cenário 1, foi calculado o consumo de combustível para esta configuração de despacho ótimo. O resultado desta simulação foi a redução de 2,8% no consumo específico em relação ao cenário 1 e, conseqüentemente, redução do consumo de combustível.

Durante a simulação, foi parametrizado reserva girante de geração de 10% da potência nominal para cada MCI, a fim de garantir a estabilidade do sistema, ou seja, quando a potência dos MCI atinge 90% de carga, é adicionado outro MCI ao sistema, aumentando a confiabilidade. Esta condição evita que pequenas variações de carga ultrapassem o valor máximo de potência dos MCI que poderiam ocasionar “queda do sistema”, situação de sobrecarga ou curto-circuito, em que o sistema de proteção da usina atua, desligando os MCI para proteção.

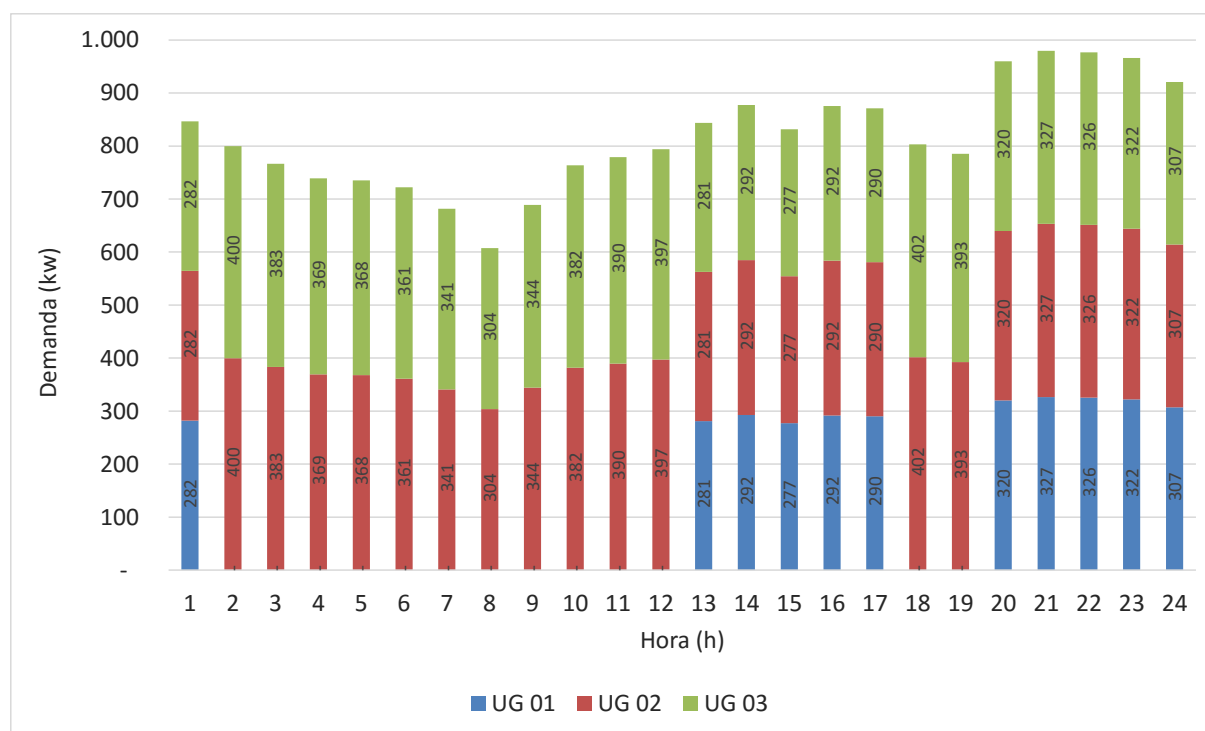


Figura 4-12 Despacho dos MCI (despacho ótimo)

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de simulação software OTSI

Comparando o despacho do cenário 2 (Figura 4-12) com o do cenário 1 (Figura 4-10), observa-se que foi possível reduzir o número de MCI em operação durante a madrugada e início da manhã.

Esta condição elevou o fator de carregamento médio da usina em 15,4% em relação ao cenário 1 (Figura 4-13).

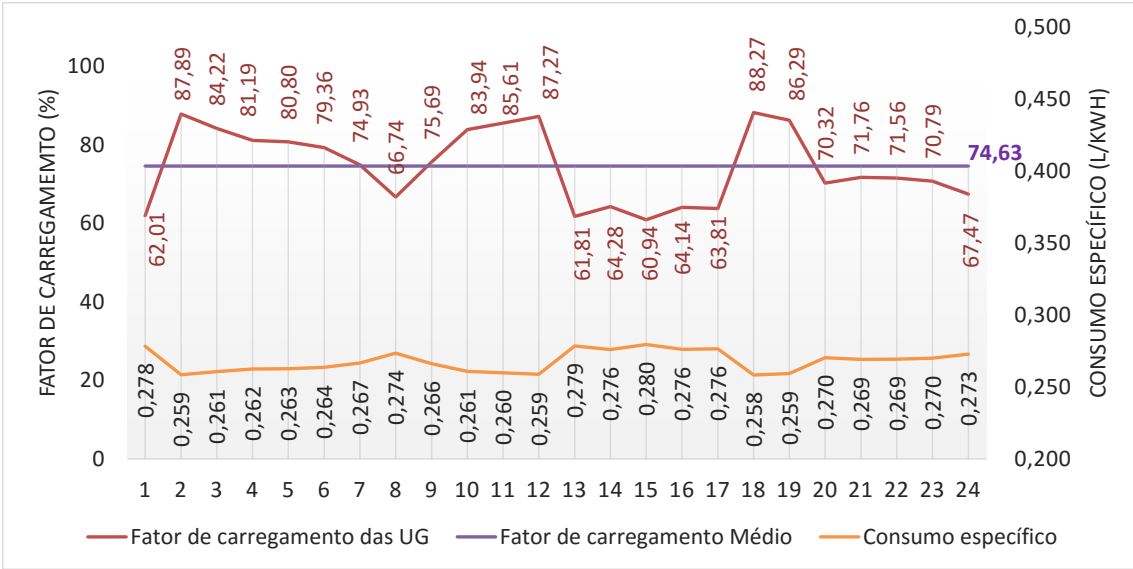


Figura 4-13 Fator de carregamento dos MCI (despacho ótimo)

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4-4 apresenta o resultado da configuração da usina com o despacho ótimo, onde o consumo específico mensal calculado se reduziu de 0,276 para 0,268 L/kWh. Com isto, houve redução do Custo Total de Geração ( $R_{CC}$ ), reduzindo o consumo mensal em 4.560 L no valor de R\$11.961,00 mês que, em 1 ano, resulta numa economia de R\$43.532,00.

Vale destacar que, na Tabela 4-4, que considera a otimização do despacho, não é aplicável a sub-rogação do combustível evitado, por se tratar de uma ação operacional não envolvendo custos diretos na alteração da configuração do sistema, portanto fora das condições previstas no item 2.4.6 para sub-rogação.

Tabela 4-4 Análise do Cenário 2

| Cenário 2 - MCI - Despacho Ótimo   |                   |
|------------------------------------|-------------------|
| Geração de Energia                 | 588.462 kWh       |
| Consumo Diesel                     | 157.789 L         |
| Consumo Específico                 | <b>0,268</b>      |
| Custo Combustível                  | 413.881 R\$ (mês) |
| Reembolso Custos Totais de Geração | 300.537 R\$ (mês) |
| Combustível Evitado                | 4.560 L           |
| Custo de Combustível Evitado       | 11.961 R\$ (mês)  |
| Sub-rogação (parcela mensal)       | NA* R\$ (mês)     |

\* NA: Não aplicável

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.4 Cenário 3 – MCI - Despacho Ótimo + ORC

Neste cenário, foi utilizada a aplicação da tecnologia de Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) apresentada anteriormente no item 2.6 para redução do consumo combustível na usina.

Segundo o catálogo dos motores Cummins QSX-15- G9 (anexo 1) utilizados na usina de Jacareacanga, a temperatura dos gases de escape é de 468°C, atingindo, portanto, temperatura suficiente para utilização do ORC através da recuperação residual dos gases de escape.

Para o cálculo das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho, R245fa, foi utilizada a biblioteca de software livre “coolprop”, multi-plataforma que fornece os parâmetros termodinâmicos do fluido de trabalho.

A Figura 4-14 mostra a modelagem desenvolvida neste trabalho, da aplicação do ORC para Recuperação de Calor Residual (WHR) dos gases de exaustão dos MCI da usina, considerando seus principais componentes – Evaporador, Turbina, Condensador e Bomba.

A adição de calor no Evaporador ( $Q_{ev}$ ) à pressão constante de 3 MPa ( $P_3$ ) fornece vapor a 150°C ( $T_3$ ). Este vapor se expande isentropicamente na Turbina ( $W_t$ ) (processo 3-4) de acordo com a Equação 4.2.

$$W_t = (h_3 - h_4) * \eta_t * \eta_g \quad (4.2)$$

Onde:

$W_t$ : Trabalho fornecido pela turbina (W);  
 $h_3$  e  $h_4$ : Entalpias nos pontos 3 e 4 respectivamente (kJ/kg); e  
 $\eta_t$  e  $\eta_g$ : Rendimentos da turbina e gerador respectivamente (%).

Em seguida, o calor do vapor é rejeitado através do Condensador, o qual transforma o vapor em líquido à temperatura de aproximadamente 40°C ( $T_1$ ) (processo 4-1) de acordo com a Equação 4.3.

$$Q_{cond} = (h_1 - h_4) \quad (4.3)$$

Onde:

$Q_{cond}$ : Calor rejeitado no condensador (W); e  
 $h_1$  e  $h_4$ : Entalpias nos pontos 1 e 4 respectivamente (kJ/kg).

O processo 1-2 consiste na compressão isentrópica na Bomba ( $W_b$ ) do R245fa dada pela Equação 4.4.

$$W_b = (h_2 - h_1) / \eta_b \quad (4.4)$$

Onde:

$W_b$ : Trabalho absorvido pela bomba (W);  
 $h_1$  e  $h_2$ : Entalpias nos pontos 1 e 2 respectivamente (kJ/kg); e  
 $\eta_b$ : Rendimento da bomba (%).

O ciclo se fecha no Evaporador com a adição de calor de acordo com a Equação 4.5

$$Q_{ev} = h_3 - h_2 \quad (4.5)$$

Onde:

$Q_{ev}$ : Calor fornecido pelo Evaporador (W); e

$h_3$  e  $h_2$ : Entalpias nos pontos 3 e 2 respectivamente (kJ/kg);

Finalmente, o Rendimento do ciclo é dado pela Equação 4.6.

$$\eta_{ORC} = (W_t - W_b) / Q_{ev} \quad (4.6)$$

Onde:

$\eta_{ORC}$ : Rendimento do ciclo ORC (%);

$W_t$  e  $W_b$ : Trabalho na turbina e bomba respectivamente (W); e

$Q_{ev}$ : Calor fornecido pelo Evaporador (W).

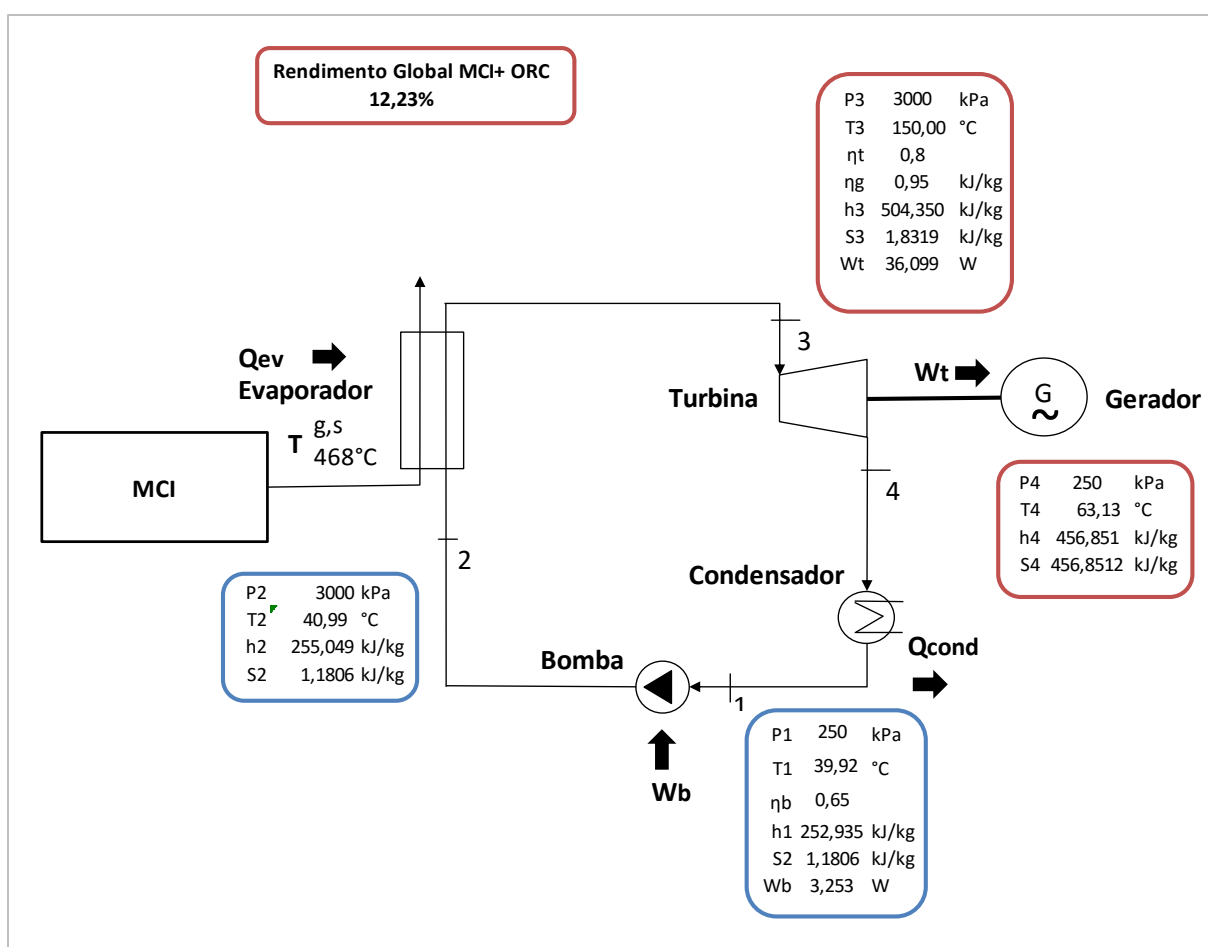


Figura 4-14 Modelagem do MCI + ORC

Para a simulação com a modelagem proposta, foram utilizados 2 MCI de 455 kW, cada um, operando com potência nominal máxima de 410 kW, em um total de 820 kW, para garantir reserva girante de potência e, assim, manter a estabilidade do sistema. Os gases de escape dos 2 MCI alimentam o Evaporador de 1 módulo ORC com potência em torno de 120 kW; de acordo com a

potência disponibilizada pelos principais fabricantes de ORC (Tabela 2-9), podem ser adotados os módulos de 125 ou 130 kW.

A eficiência do ORC considerada foi de, aproximadamente, 12 %, em sistema MCI-ORC, segundo Vaja e Gabarotta (2010), corroborado com a modelagem apresentada.

Através do incremento de potência obtido pela utilização do ORC, foi possível desligar a UG 01 durante a maior parte do dia típico, sendo necessária sua utilização somente durante período noturno de ponta de carga (Figura 4-15).

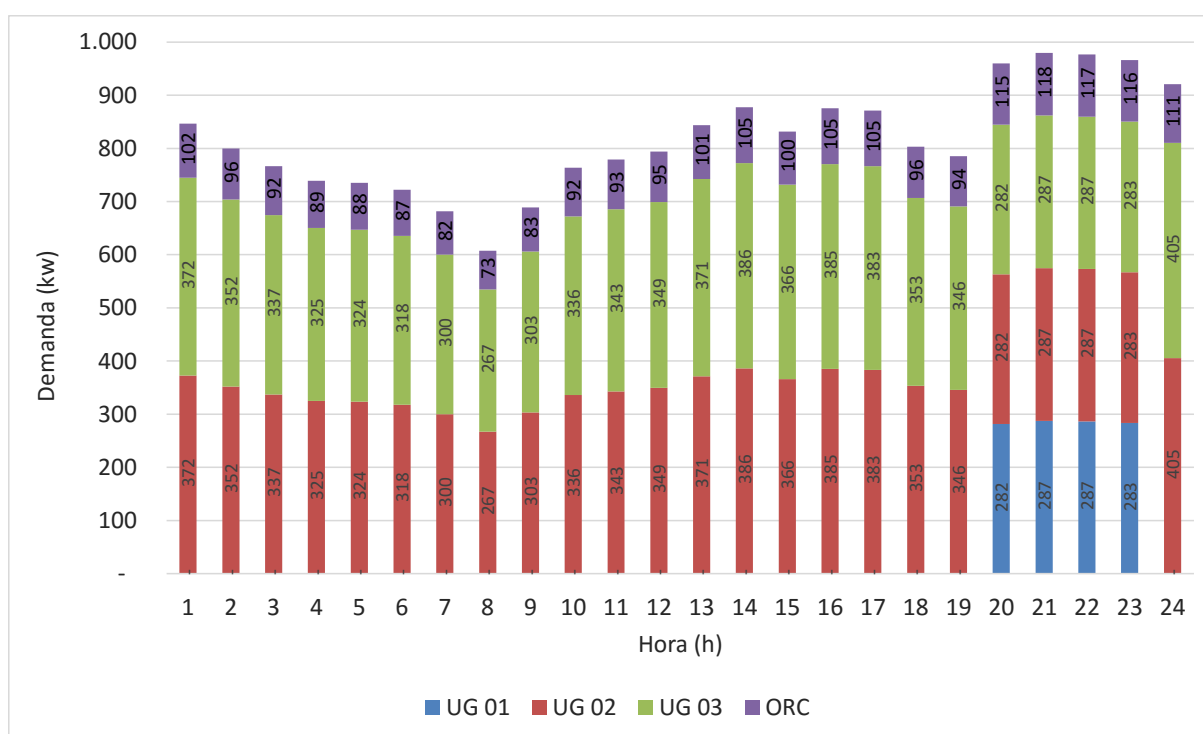


Figura 4-15 Despacho dos MCI + Despacho ótimo + ORC

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do software OTSI + ORC

É possível observar que, na Figura 4-16, não houve alteração do carregamento médio dos MCI em comparação com o cenário anterior, pois, apesar do incremento de potência do ORC reduzir o fator de carga dos MCI, com a adição do ORC, foi possível desligar um MCI durante quase todo o período de operação, sendo necessário 3 MCI somente no período de ponta de carga.

Esta situação evita que parte da eficiência devido à adição do ORC seja absorvida pela redução do fator de carga nos MCI, o que resultaria em uma redução do consumo específico de combustível menor no sistema.

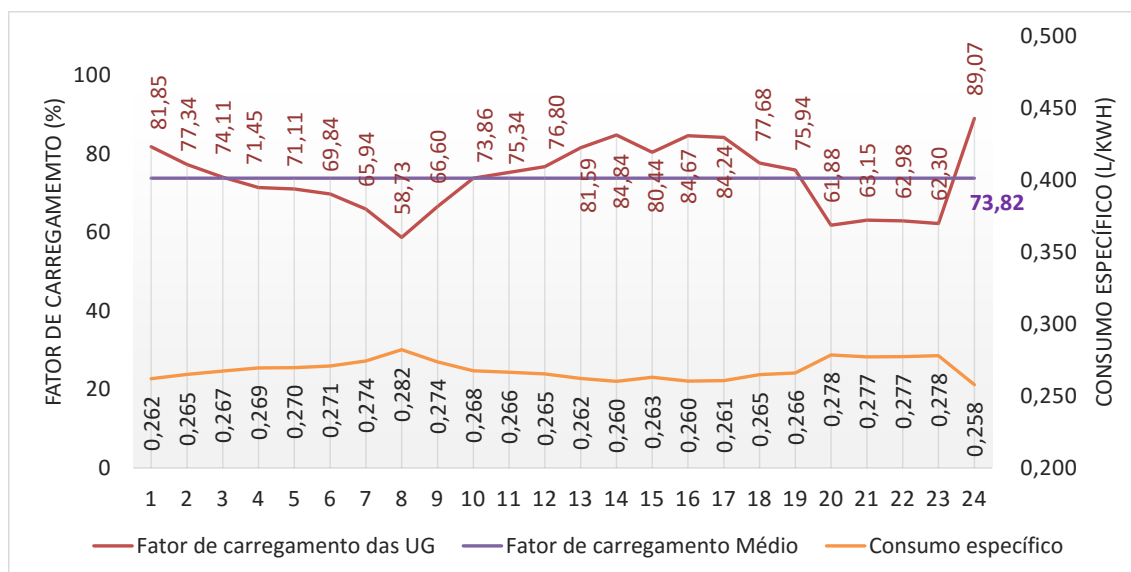


Figura 4-16 Fator de carregamento dos MCI + Despacho ótimo + ORC

Fonte: Elaboração própria

O resultado da simulação do sistema Diesel – ORC (Tabela 4-5) com despacho ótimo evita o consumo de 23.449 L de diesel ao mês, o que corresponde a R\$ 61.507 por mês de economia com combustível, com consumo específico mensal de 0,236 L/kWh.

Tendo em vista que o ORC utiliza como fonte de energia os gases de escape dos MCI, ao se aplicar os cálculos de sub-rogação, conforme item 2.4.6, é possível obter um reembolso mensal no valor do combustível evitado (R\$61.507,00) para ressarcimento do custo de até 75% do projeto de aplicação do ORC, ou seja, é pago o valor de R\$61.507,00 mensais pelo período necessário para reembolso de 75% do custo total com a implantação do subsistema ORC.

Tabela 4-5 Análise do Cenário 3

| Cenário 3 - MCI - Despacho Ótimo + ORC |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| Geração de Energia                     | 588.462 kWh       |
| Consumo Diesel                         | 138.900 L         |
| Consumo Específico                     | <b>0,236</b>      |
| Custo Combustível                      | 364.335 R\$ (mês) |
| Reembolso Custos Totais de Geração     | 250.991 R\$ (mês) |
| Combustível Evitado                    | 23.449 L          |
| Custo de Combustível Evitado           | 61.507 R\$ (mês)  |
| Sub-rogação (parcela mensal)           | 61.507 R\$ (mês)  |

Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.5 Cenário 4 – MCI - Despacho Ótimo + ORC + PV

Do mesmo modo como apresentado nos cenários anteriores, este último cenário contempla o sistema MCI – ORC – PV. Este sistema é composto pelos subsistemas MCI – ORC, apresentado no cenário 3, com a adição de painéis fotovoltaicos (PV).

Através do despacho apresentado na Figura 4-15, do cenário anterior, é possível observar que, durante 4h no horário de ponta de carga, há a necessidade de se operar 3 MCI juntamente com o ORC para suprir a demanda da localidade. Com isto, a adição do subsistema PV para suprir a demanda de modo que melhore o fator de carregamento dos motores e o desligamento de um MCI se mostrou uma boa opção durante as simulações, com incremento de 2,5% de eficiência em relação ao cenário 3.

A Figura 4-17 apresenta o despacho do sistema híbrido proposto. Observa-se que o uso dos painéis fotovoltaicos ocorre apenas durante o período de 4h no horário de ponta de carga à noite, com uma demanda de 50 kW, totalizando um consumo de 200 kWh/dia. Aplicando a Equação 2.9, o sistema PV é composto por 194 placas de 250Wp para fornecer a energia requerida.

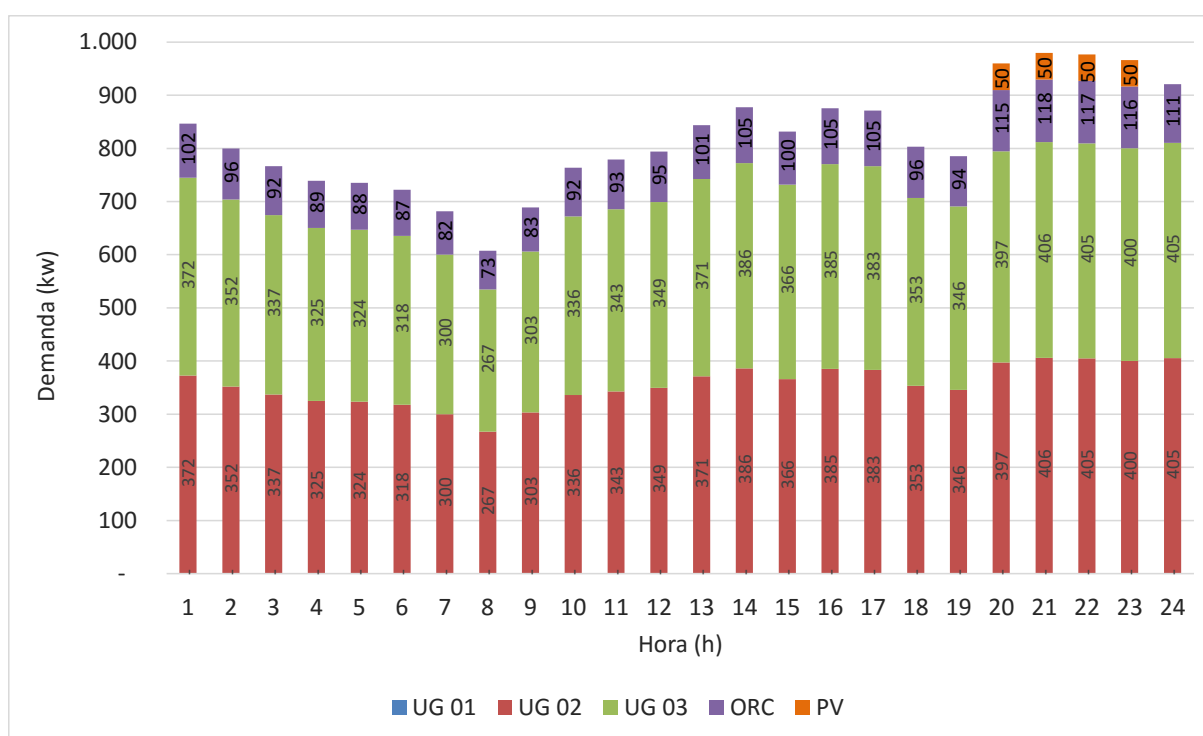


Figura 4-17 Despacho dos MCI + Despacho ótimo + ORC + PV

Fonte: Elaboração própria

Com a adição do sistema PV o carregamento médio da usina aumentou de 74% para 78% (Figura 4-18), sendo esta condição favorável ao consumo de combustível dos MCI e para a eficiência do ORC.

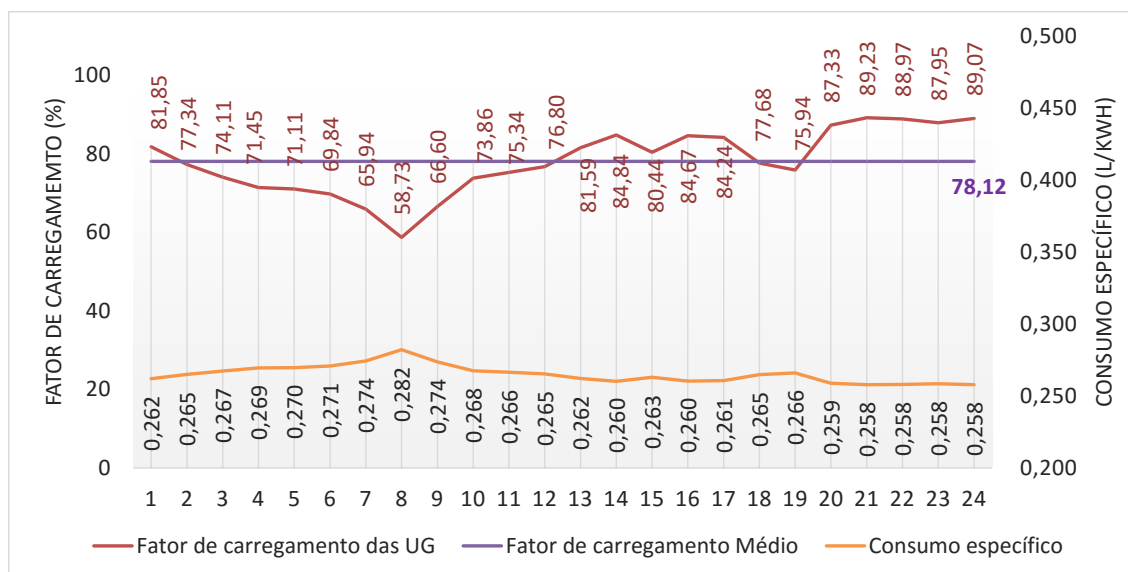


Figura 4-18 Fator de carregamento dos MCI + Despacho ótimo + ORC + PV

Fonte: Elaboração própria

Dentro do exposto anteriormente, o sistema proposto neste cenário acarretou um consumo específico de 0,230L/kWh, com 26.995 L de diesel evitado, que corresponde a R\$70.808/mês de economia. Este valor, assim como no cenário 3, pode ser sub-rogado mensalmente para reembolso com os custos de implantação deste sistema.

A Tabela 4-6 apresenta o resumo da simulação do sistema apresentado.

Tabela 4-6 Análise do Cenário 4

| Cenário 4 - MCI - Despacho Ótimo + ORC + PV |              |           |
|---------------------------------------------|--------------|-----------|
| Geração de Energia                          | 588.462      | kWh       |
| Consumo Diesel                              | 135.354      | L         |
| Consumo Específico                          | <b>0,230</b> |           |
| Custo Combustível                           | 355.034      | R\$ (mês) |
| Reembolso Custos Totais de Geração          | 241.690      | R\$ (mês) |
| Combustível Evitado                         | 26.995       | L         |
| Custo de Combustível Evitado                | 70.808       | R\$ (mês) |
| Sub-rogação (parcela mensal)                | 70.808       | R\$ (mês) |

Fonte: Elaboração própria

## 4.2.6 Análises Comparativa e Econômica

### 4.2.6.1 Comparativo Entre Cenários

A Figura 4-19 resume os resultados das opções avaliadas para redução do consumo específico de combustível nos quatro cenários desenvolvidos neste capítulo.

Os resultados evidenciam a redução do consumo específico com a aplicação do ORC, o qual apresentou a redução mais significativa e, conseqüentemente redução do consumo de combustível nos MCI durante o atendimento da demanda da localidade de Jacareacanga.

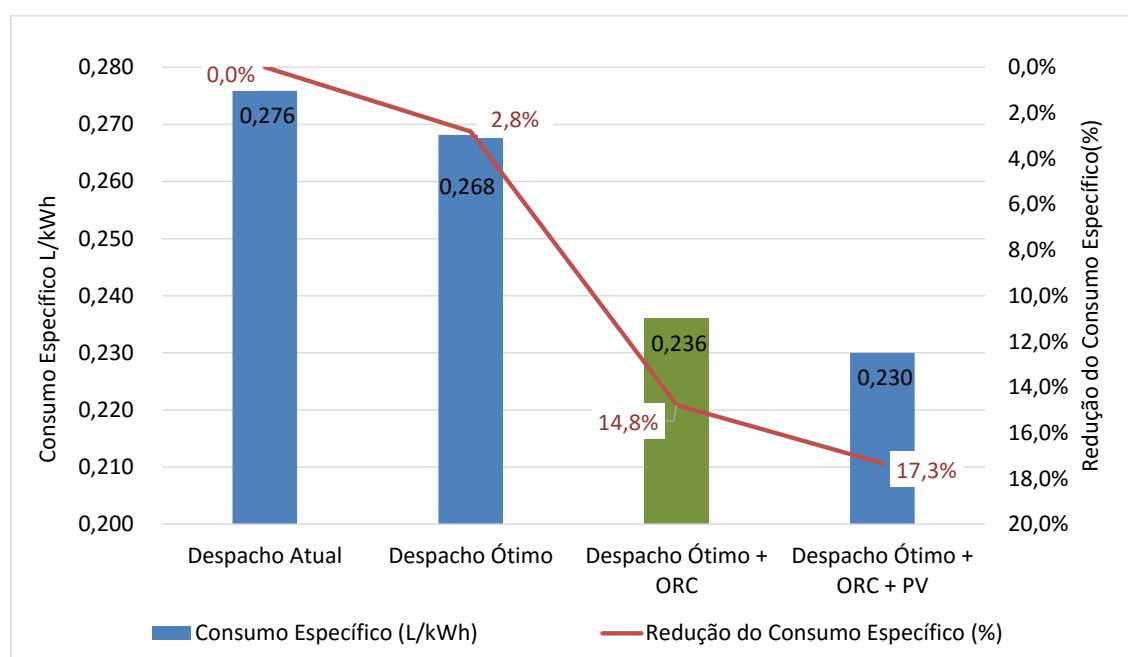


Figura 4-19 Análise comparativa dos cenários

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados encontrados

O sistema MCI – Despacho Ótimo + ORC – PV apresentou redução no consumo específico de 17,3% em relação à situação atual da usina.

A Figura 4-20 apresenta o percentual médio que as usinas nos Sistemas Isolados ultrapassam o limite de consumo específico definido pela ANEEL. A replicabilidade deste estudo de caso nas diversas usinas pode ser uma boa solução para resolver esta situação encontrada nos Sistemas Isolados.

Como a usina de Jacareacanga opera com consumo específico dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL, os resultados do estudo de caso são conservadores com relação às usinas apresentadas no item 3.6, onde 80% das usinas não recebem o reembolso total do combustível gasto por apresentarem consumo específico acima do permitido. Sendo assim, a economia com o custo de combustível poderá ser ainda maior dependendo do caso.

Com a aplicação do ORC juntamente com PV e o Despacho Ótimo, tem-se uma redução do consumo específico em torno de 17%, que seria suficiente para suprir a maioria das usinas que excedem o limite de consumo específico nos Sistemas Isolados.

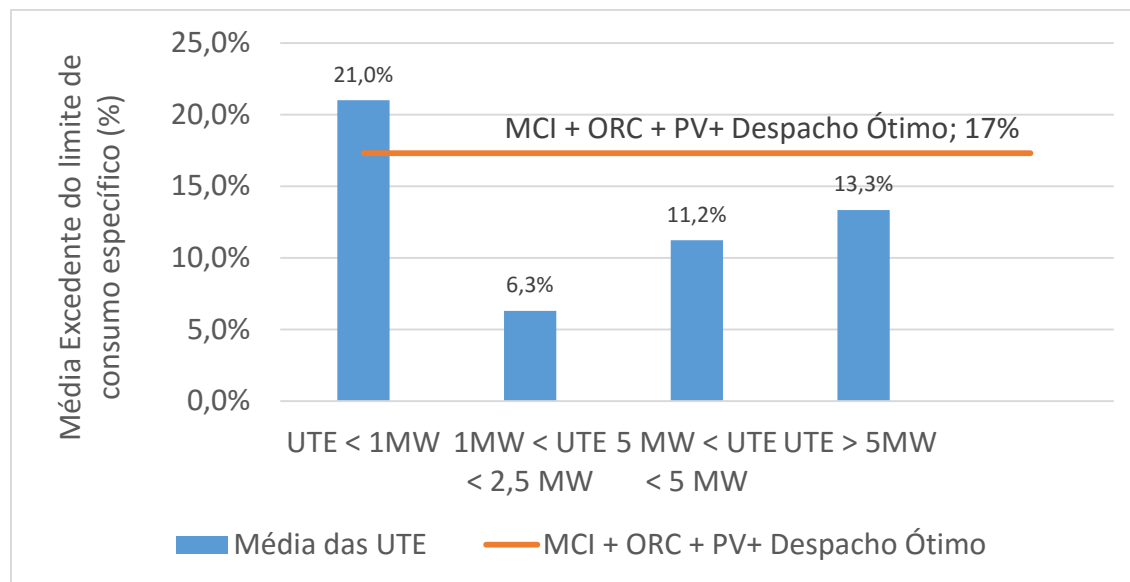


Figura 4-20 Porcentagem que as usinas excedem limite de consumo específico dos Sistemas Isolados por faixa de potência

#### 4.2.6.2 Análise Econômica

Após as análises desenvolvidas neste trabalho, se faz necessário avaliar os aspectos econômicos que auxiliam a tomada de decisão quanto à viabilidade de implementação das alternativas tecnológicas para a redução de consumo de combustível nos Sistemas Isolados.

Para se avaliar a viabilidade econômica das usinas, será utilizada a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e Taxa Interna de Retorno (TIR). A TMA é a expectativa mínima de retorno financeiro que se espera de um investimento, em relação à taxa de juros. A TMA adotada depende de vários fatores, mas comumente adota-se a SELIC Anual, que em 2015 fechou o ano em 14,25% (BACEN, 2015). Já a Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de juros que iguala os fluxos de rendimento de cada período aos gastos realizados no mesmo período, fazendo com que o Valor Presente Líquido (VPL) seja nulo. Assim, compara-se a TIR com a TMA para analisar a viabilidade econômica do empreendimento, ou seja, quando a TIR for maior que TMA, o projeto é dito viável economicamente.

O valor da energia elétrica para as usinas varia de contrato para contrato. Neste trabalho foi utilizado o valor do último leilão para usinas dos Sistemas Isolados em Rondônia, como referência, no valor de R\$/938,94 MWh (Leilão Rondônia, 2015).

O valor do investimento com o módulo ORC e PV é apresentado na Tabela 4-7, onde o valor do dólar utilizado foi de R\$ 3,02 (maio 2015) por ser o valor do mesmo período do valor do

combustível (R\$ 2,623 /L). Além disso, é informado o valor referente ao reembolso de sub-rogação da CCC aos projetos.

Tabela 4-7 Custo de Investimento em ORC e PV

|     | Custo Unitário<br>(R\$/kW) | Potência<br>(kW) | Custo Total<br>Projeto (R\$) | 75% projeto a ser<br>sub-rogado (R\$) |
|-----|----------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| ORC | 32.314                     | 130              | 4.200.820                    | 3.150.615                             |
| PV  | 10.000                     | 50               | 500.000                      | 375.000                               |

Fonte: Elaborado a partir dos dados Rettig et al. (2011) e Mayer J. (2015)

A Tabela 4-8 apresenta o potencial de redução de combustível com os sistemas propostos. Esta redução com o custo de combustível melhora a eficiência da usina, que continua gerando a mesma quantidade de energia com menos combustível.

Tabela 4-8 Análise comparativa de economia de combustível (diesel)

|                           | Economia com combustível |             |               |
|---------------------------|--------------------------|-------------|---------------|
|                           | Mês                      | 1 Ano       | 10 Anos       |
| Despacho Atual            | -                        | -           | -             |
| Despacho Ótimo            | R\$ 11.961               | R\$ 143.531 | R\$ 1.435.306 |
| Despacho Ótimo + ORC      | R\$ 61.507               | R\$ 738.084 | R\$ 7.380.836 |
| Despacho Ótimo + ORC + PV | R\$ 70.808               | R\$ 849.695 | R\$ 8.496.954 |

Fonte: Elaboração própria

Baseado na economia anual de combustível e a venda da energia elétrica do empreendimento foi possível analisar a viabilidade econômica conforme apresentado nas Tabela 4-9 e Tabela 4-10 para ORC e PV, respectivamente.

Para o ORC, tem-se que anualmente será reembolsado o valor de R\$ 738.084 até o valor de 75% do projeto somado ao valor da energia gerada anualmente durante toda a vida útil do projeto no valor de R\$ 795.645.

Observa-se que a TIR do projeto foi de 21,03% em 5 anos considerando o reembolso da sub-rogação.

Tabela 4-9 Análise econômica implantação ORC

| <b>ORC<br/>(130 kW)</b> | ano | Total<br>Investimento<br>(A = B + C) | B                           | C                               |
|-------------------------|-----|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Investimento Inicial    | 0   | -R\$ 4.200.820                       | Parcela Subrogação<br>(R\$) | Venda da Energia<br>anual (R\$) |
|                         | 1   | R\$ 1.533.728                        | R\$ 738.084                 | R\$ 795.645                     |
|                         | 2   | R\$ 1.533.728                        | R\$ 738.084                 | R\$ 795.645                     |
|                         | 3   | R\$ 1.533.728                        | R\$ 738.084                 | R\$ 795.645                     |
|                         | 4   | R\$ 1.533.728                        | R\$ 738.084                 | R\$ 795.645                     |
|                         | 5   | R\$ 993.925                          | R\$ 198.280                 | R\$ 795.645                     |
| TMA                     |     | 14,25%                               |                             |                                 |
| TIR                     |     | 21,90% > TMA                         | (aprovado)                  |                                 |
| VPL                     |     | R\$ 755.806,72                       | VPL > 0 (aprovado)          |                                 |

A Tabela 4-10 apresenta a TIR para os investimentos em PV efetuados neste cenário, no qual em 5 anos é possível obter uma TIR de 15,43%.

Tabela 4-10 Análise econômica implantação PV

| <b>PV<br/>(50 kW)</b> | ano | Total<br>Investimento<br>(A = B + C) | B                           | C                               |
|-----------------------|-----|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Investimento Inicial  | 0   | -R\$ 500.000                         | Parcela Subrogação<br>(R\$) | Venda da Energia<br>anual (R\$) |
|                       | 1   | R\$ 179.215                          | 111.612                     | 67.604                          |
|                       | 2   | R\$ 179.215                          | 111.612                     | 67.604                          |
|                       | 3   | R\$ 179.215                          | 111.612                     | 67.604                          |
|                       | 4   | R\$ 107.768                          | 40.165                      | 67.604                          |
|                       | 5   | R\$ 67.604                           | 0                           | 67.604                          |
| TMA                   |     | 14,25%                               |                             |                                 |
| TIR                   |     | 15,43% > TMA                         | (aprovado)                  |                                 |
| VPL                   |     | R\$ 12.312,80                        | VPL > 0 (aprovado)          |                                 |

Finalmente, os resultados obtidos no estudo de caso, considerando a aplicação das tecnologias de Recuperação de Calor Residual (WHR) dos gases de escape dos Motores de Combustão Interna (MCI), utilizado no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) juntamente com Geração Fotovoltaica (PV), como alternativas para redução do consumo de combustível durante a geração de energia elétrica apresentaram índices atrativos de eficiência.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusão

Retomando o item 1.2 do capítulo 1, os objetivos desta dissertação foram diagnosticar as usinas termelétricas dos Sistemas Isolados, do ponto de vista de adequação aos limites de consumo específico de combustível estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e, em seguida, foram propostas alternativas de redução dos mesmos.

Sob esta óptica, foi realizada pesquisa dos tipos de usinas encontradas nos Sistemas Isolados, onde apurou-se que existem, atualmente, 226 usinas termelétricas a diesel, instaladas todas na região norte do Brasil.

Estas usinas são reguladas por uma legislação que subsidia quase que totalmente os custos de geração e que teve início em 1973. A legislação ao longo dos anos foi sendo modificada e atualizada e, em 2011, com a entrada em vigor da Resolução Normativa nº 427 da ANEEL, foram introduzidas mudanças significativas na forma de reembolsar as usinas pelo combustível utilizado na geração, tendo em vista que a geração termelétrica nos Sistemas Isolados necessita de subsídio para que as tarifas de energia praticadas não sejam elevadas em relação às tarifas de energia dos Sistemas Interligados. Até 2011, havia um valor único de consumo específico de combustível (0,300 L/kWh) aplicado para todas as usinas, independentemente de sua potência. Após esta data, com a entrada em vigor da Resolução 427, iniciou-se um processo de restrição dos limites até 2014, quando os valores de consumo específico máximo permitido para as usinas com potência maior atingiram seu patamar mais baixo.

Diante deste contexto, foram obtidos os consumos de combustível e a geração de energia das usinas dos Sistemas Isolados realizados em 2014. Após a tabulação desses dados e comparando uma usina com a outra em valores percentuais, chegou-se ao valor de 80% das usinas que estavam com consumo específico que ultrapassavam os limites máximos permitidos pela legislação. O excedente de combustível deixa de ser passível de reembolso, sendo um prejuízo para as usinas. A partir desta constatação, foi realizado o levantamento dos modelos, potência e fabricante dos MCI que operam nas usinas dos Sistemas Isolados e, posteriormente, realizada uma comparação do consumo específico definido para cada faixa de potência da usina com as curvas ISO dos motores existentes nos Sistemas Isolados. O resultado obtido indicou que os motores, individualmente, estão com consumo específico dentro do previsto na legislação, mas uma usina é composta por vários motores. Para usinas com potência instalada de 250 kW a 20.000 kW, situação que engloba 69,3% das usinas, os valores de consumo específico apresentados são muito próximos dos limites da legislação, mas por serem uma referência de condições ótimas, estes valores, na

prática, podem ultrapassar os limites da legislação, fato que pode explicar a condição real encontrada nas usinas dos Sistemas Isolados, onde 80% não conseguem gerar energia com consumo específico dentro dos limites da legislação.

Sem dúvida, o alto consumo específico das usinas possui outros fatores que podem ser encontrados nas usinas, tais como a falta de manutenção, problemas de arrefecimento dos radiadores, motores com desgaste devido ao grande número de horas de operação. Mas, independente disso, a constatação de que 69% das usinas operam com modelo de motores que possuem consumo específico próximo do limite da legislação é uma situação que merece destaque.

Diante disto, foram propostas alternativas para redução do consumo específico com a realização de estudo de caso na usina de Jacareacanga, a qual possui 1,8 MW de potência instalada.

O primeiro estudo utilizou a otimização do despacho realizando como ferramenta o software do CEPEL para otimização de usinas nos Sistemas Isolados. Como resultado, foi obtida uma redução do consumo específico da usina de 2,8%, reduzindo de 0,276 para 0,268 L/kWh. Com isto, evita-se, apenas com a operação otimizada, sem necessidade de investimento, uma economia de R\$ 143.500/ano com combustível.

O segundo estudo adicionou um módulo ORC de 100 kW, que aproveita os gases de exaustão dos motores da usina, para fornecer um incremento de energia elétrica à usina. Como a usina já havia reduzido 2,8% com a otimização, ao adicionar o módulo ORC, o conjunto final apresentou uma redução de 14,8% do consumo específico da usina, com uma economia de R\$ 738.100/ano com combustível.

A terceira e última alternativa foi a adição de painéis fotovoltaicos PV (50kW) para completar a geração no horário de ponta de carga. Como resultado da operação otimizada do despacho dos motores, somado à adição do módulo ORC e os painéis fotovoltaicos, o sistema apresentou uma redução no consumo específico da usina de 17,3%, com uma economia de R\$ 849.695/ano.

Por fim, com a utilização do subsídio para investimentos nos Sistemas Isolados que reduzam total ou parcialmente o consumo de combustível denominado sub-rogação, o qual reembolsa 75% do investimento, foi calculada a Taxa Interna de Retorno (TIR) dos empreendimentos, apresentando um retorno para os investimentos em ORC e PV em 5 anos viável com TIR de 21,9 e 15,43% respectivamente.

Espera-se com isto, que a replicabilidade deste estudo de caso nas diversas usinas possa ser uma boa solução para resolver a difícil situação encontrada nos Sistemas Isolados quanto à questão do consumo de combustível.

## 5.2 Sugestão de Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento desta dissertação, identificou-se como oportunidades de trabalhos futuros os temas abaixo relacionados:

- Estudo de logística tanto de abastecimento de combustível, como de manutenção das usinas termelétricas nos Sistemas Isolados, que podem impactar, significativamente, a geração de energia;
- Seguindo o raciocínio de limites de consumo específico cada vez mais restritivo, a ANEEL, a partir de janeiro de 2015, passou a adotar um coeficiente de perdas regulatórias na distribuição na fórmula de reembolso do combustível utilizado pelas usinas. Este fator faz com que o agente gerador passe a se preocupar não somente com a geração na usina, mas também com a distribuição de energia. Deste modo, sugere-se um estudo do impacto deste novo fator de perdas na operação e no reembolso do combustível;
- Comparação de operação de usina com PV e a distribuição destes painéis pelos sistemas isolados. Por exemplo, caso tenha 10kW em PV instalado na usina, a mesma potência poderia ser dividida em 5 mini usinas de 2kW cada alocados na rede de distribuição. Com esta geração distribuída, seria interessante verificar se haveria influência na redução do consumo de combustível; e
- Projeto de referência de MCI – ORC para usinas termelétricas que possa ser replicável, indicando todo processo de manutenção e operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE. **Microgeração fotovoltaica no Brasil – Viabilidade Econômica**. 2015. USP.

Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/mifoto.pdf>>. março 2015

Instituto De Energia E Ambiente Da Usp.

AEC, E. **Acompanhamento de Estoque Combustível - AEC Eletrobras**. 2013.

Disponível em:<<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISF81A08D1PTBRIE.htm>>.

AEC, E. **Acompanhamento de Estoque de Combustível - AEC Eletrobras**. 2014.

Disponível em:<<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISF81A08D1PTBRIE.htm>>.

AGREEKO. **Agreeko**. 2015.

Disponível em: <<http://www.aggreko.com.br/>>.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2014.

Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=17&idPerfil=8>>.

ANP PREÇO. **Agência Nacional do Petróleo**. 2015.

Disponível em: <[www.anp.gov.br/preco](http://www.anp.gov.br/preco)>.

BARBOSA, C. F. O. **Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos Para Geração de Eletricidade na Amazônia**. 2006. Dissertação de (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Belém. 2006.

Bell, Ian H. and Wronski, Jorrit and Quoilin, Sylvain and Lemort, Vincent. **Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp**. 2014. Industrial & Engineering Chemistry Research. Disponível em:<[www.coolprop.org](http://www.coolprop.org)>.

CCEE. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. 2014.

Disponível em:<[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/inicio?\\_afzLoop=1130436081670051#%40%3F\\_afzLoop%3D1130436081670051%26\\_adf.ctrl-state%3Dweodggo9r\\_4](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/inicio?_afzLoop=1130436081670051#%40%3F_afzLoop%3D1130436081670051%26_adf.ctrl-state%3Dweodggo9r_4)>.

Acesso em: 2014.

CELPA. **Centrais Elétricas do Pará**. 2015.

Dados Coletados na Agência da Distribuidora em Jacareacanga.

CHIGUERU TIBA et al **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos / coordenador.- Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2000.

CRESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. 2014.

Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)>.

CUMMINS POWER. **Manual de Aplicação de Grupos Geradores Arrefecidos a Água**. 2014.

CUMMINS, P. Catálogos e Folhetos de Grupos Geradores diesel.

Disponível em: <<http://www.cumminspower.com>>. Acesso em: agosto 2014.

DOMINGUES, A. M. M. **Avaliação do Potencial de Aproveitamento da Energia Contida nos Gases de Escape de Veículos Automóveis**. Lisboa. 2011.

DRESSER-RAND. **Dresser-Rand Guascor**. 2014.

Disponível em: <<http://www.guascor.com.br/?p=299>>. Acesso em: 2015.

ELIZABETH F. et all. **Análise Técnica e Econômica de um Sistema Híbrido Solar-diesel**. Planejamento de Sistemas Energéticos da Universidade Estadual de Campinas. 2013.

FENG LIMING, G. W. Q. H. X. B. **Heat Recovery from Internal Combustion Engine**. State Key Laboratory of Engines. Tianjin. China, 2012.

FLEURY, G. W. S.; VIEIRA, L. S. R. **Metodologia de Cálculo de Limitantes de Consumo Específico para Sistemas Isolados**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. 2008.

Gegun Shu, et all. **Alkanes as Working Fluids for High-temperature Exhaust Heat Recovery of Diesel Engine using Organic Rankine Cycle**. Elsevier. 2014.

GRONE, O.; HELLMANN, J. O. **Low Speed Engines in Stationary Diesel Plants**. 1997.

GUASCOR. **Dresser-Rand Guascor**. 2015.

Disponível em: <<http://www.guascor.com.br/>>.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2014.

Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas\\_da\\_populacao/default\\_caracteristicas\\_da\\_populacao.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/default_caracteristicas_da_populacao.shtm)>. Acesso em: 2014.

Honeywell **HFC-245fa Product Stewardship summary**. 2007.

João T.avares P., et all. **Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico-Diesel para Eletrificação da Comunidade de São Tomé - Município de Maracanã - Pará**. GEDAE/UFPA – Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas/Universidade.

Johannes N. Mayer. **Current and Future Cost of Photovoltaics Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems**. 2015. Institute for Solar Energy Systems (ISE). Germany.

Disponível em: <[www.agora-energie.wende.de](http://www.agora-energie.wende.de)>.

KAGAN, N.; ROBBA, J. E. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. [S.l.]: Edgard Blücher, 2005.

KINDERMAN, G. **Curto Circuito**. Porto Alegre: Sacra Luzzatto, 1997.

LEÃO, R. P. S. Apostila de GTD - **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Federal do Ceará. 2011.

LEI 12.111. **Dispõe sobre os serviços de energia elétrica nos Sistemas Isolados**, 2009.

Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato20072010/2009/Lei/L12111.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20072010/2009/Lei/L12111.HTM)>.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1 e 2, 2004.

MICHAEL J., M. S. **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. 2005.

ONAN. **Technical bulletin – Rating Factors for Electric Generating Sets**. Minneapolis, Minnesota. 1974.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 2014.

Disponível em: <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)>.

OTSI CEPEL. **CEPEL - Programas Computacionais para Otimização e Simulação de Sistemas Isolados**. 2009.

Disponível em: <Programas Computacionais para Otimização e Simulação de Sistemas Isolados>. Acesso em: 2014.

PASI-EPE. **Instruções para Elaboração e Apresentação de Projetos Alternativos aos Projetos de Referência**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. [S.l.]. 2014.

PDE-EPE, E. D. P. E. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. 2014.

Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023.pdf>>. Acesso em: 06 abril. 2015.

PERKINS. **Perkins**. 2015.

Disponível em: <[https://www.perkins.com/en\\_GB/products.html](https://www.perkins.com/en_GB/products.html)>.

PINHO, J. T. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. 2008.

MME - Ministério de Minas e Energia. 2008.

PO ELETROBRAS. **Plano de Operação - Sistemas Isolados**. Eletrobras. 2015.

PORTAL do Governo Federal. **Site do Governo Federal**, 2011.

Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/sistemas-isolados>>. Acesso em: 2014.

PORTAL ELETROBRAS. **Consumo de Combustível e Geração Verificados Eletrobras**, 2014.

Disponível em: <<http://www.eletrobras.com.br/elb/data/Pages/LUMISF81A08D1PTBRIE.htm>>. Acesso em: 2014.

REN Nº 427 ANEEL. **Resolução Normativa nº 427**. 2011.

Rettig, A., **Application of Organic Rankine Cycles (ORC)**, World Engineers Convention, 2011.

RMS, **RMS - Sistemas Eletrônicos**.

Disponível em: <<http://rms.ind.br/#produtos/produto/0/registradores/1>>.

RUI LUÍS **Projecto de um ciclo de Rankine orgânico para produção de 200 kWe**. 2010.

Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto. 2010.

SCANIA, 2. **Scania**. 2014.

Disponível em: <<http://www.scania.com.br/motores/geracao-de-energia/>>.

SCD ELB. **Eletrobras - Sistemas Isolados, Sistema de Coleta de Dados**. 2014.

Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISF81A08D1PTBRIE.htm>>.

Acesso em: 2014.

SYLVAIN, Q. **Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems**. 2013.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

TURBODEN. **Turboden Clear Energy ahead**. 2015.

Disponível em: <<http://www.turboden.eu/en/applications/applications-heat-recovery.php>>.

Acesso em: 2015.

Tchance, et al. **Low Grade Heat Conversion into Power using Organic Rankine Cycles: a review of various applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 15. no 8. pp. 3963–3979, 2011.

VAJA, I.; GAMBAROTTA, A. **Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORC)**. 2010. Energy Elsevier. Parma. Italy. 2010.

WARTISILA. **Wärtisilä**, 2015.

Disponível em: <<http://www.wartsila.com/energy>>.

WEI MingShan. **Waste Heat Recovery from Heavy-duty Diesel Engine Exhaust Gases by Medium Temperature ORC System**. Science China. 2011.

## ANEXO 1– Catálogo Motor Cummins QSX15-G9

Os dados do grupo gerador C500D6, o qual utiliza o motor cummins QSX15-G9 que é utilizado na usina de Jacareacanga – PA:

### Grupos Geradores acionados por Motor Diesel



## C500D6

Nossa energia trabalhando por você.™



#### Consumo de Combustível

| Potência Nominal        | Standby |     |        |     | Prime   |     |        |     |
|-------------------------|---------|-----|--------|-----|---------|-----|--------|-----|
|                         | 625 kVA |     | 500 kW |     | 569 kVA |     | 455 kW |     |
| Carga Aplicada          | Full    | 3/4 | 1/2    | 1/4 | Full    | 3/4 | 1/2    | 1/4 |
| Consumo (Litros / Hora) | 130     | 97  | 71     | 44  | 115     | 90  | 67     | 41  |

#### Observação:

O motor acima foi testado de acordo com a ISO-3046 nas seguintes condições abaixo:

Pressão Barométrica = 100 kPa (29.53 in Hg)

Altitude acima do nível do mar = 110 m (316 ft)

Temperatura ambiente = 25° C (77° F)

Umidade relativa = 30%

Cummins®, Cummins Power Generation®, o logo "C" e Nossa energia trabalhando por você.™, são marcas registradas de Cummins Inc.

Abril 2011 - Especificações sujeitas a alterações sem aviso prévio.

©2007 Cummins Power Generation. Todos os direitos reservados.

C500D6

#### Dados Técnicos

| Modelo                            | C500D6              | Alternador - Regulação de voltagem                        | ± 1,0%     |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| Potência em Standby               | 625 kVA / 500 kW    | Alternador - Classe de isolamento                         | H          |
| Potência em Prime                 | 569kVA / 455kW      | Grau de Proteção                                          | IP 23      |
| Fabricante do Motor               | Cummins             | Consumo de Combustível a 100% de carga(Standby)           | 130 l/h    |
| Modelo do Motor                   | QSX15-G9            | Consumo de Combustível a 100% de carga (Prime)            | 115 l/h    |
| Cilindros                         | 6 cilindros         | Capacidade de óleo lubrificante                           | 83 l       |
| Construção do motor               | em linha            | Capacidade de líquido de arrefecimento (somente o motor)  | 24 litros  |
| Regulador de Velocidade/Classe    | Eletrônico          | Capacidade de líquido de arrefecimento (motor + radiador) | 58 litros  |
| Aspiração e pós-arrefecimento     | Turbinado           | Temperatura de escape (Prime)                             | 468°C      |
| Diâmetro e Curso                  | 137 mm x 169 mm     | Vazão de gases de escape (Prime)                          | 1510 l/s   |
| Taxa de Compressão                | 17 : 1              | Contra pressão máxima de escape                           | 76 mm Hg   |
| Cilindrada                        | 15 litros           | Vazão de ar do radiador                                   | 11,8 m³/s  |
| Arranque / Min °C                 | Não Auxiliada / 4°C | Consumo de ar para combustão                              | 730 l/s    |
| Capacidade da Bateria             | 150 A/h (2x)        | Minima abert. de entrada ar na sala                       | 2,24 m³    |
| Potência Bruta do Motor - Standby | 563 kWm             | Minima abert. de saída de ar na sala                      | 1,49 m³    |
| Potência Bruta do Motor - Prime   | 507 kWm             | Calor irradiado pelo motor (Prime)                        | 42 kWm     |
| Rotação                           | 1800 rpm            | Capacidade do tanque da base                              | 500 litros |

#### STANDBY POWER

Potência de emergência (standby) é a potência máxima que um grupo gerador é capaz de fornecer, para cargas variáveis, durante o período de interrupção do fornecimento de energia da concessionária, por um período de até 200 h por ano, conforme ISO8528.

#### PRIME POWER

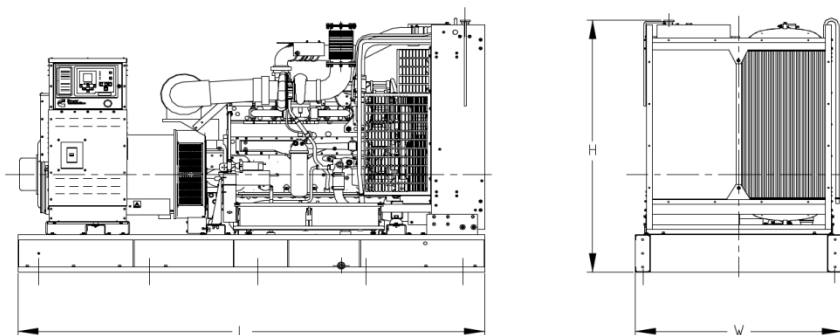
Prime power está disponível para um número ilimitado de horas anuais sob condições de carga variável, de acordo com ISO8528-1. É permitida uma capacidade de sobrecarga de 10% 1 hora a cada 12 horas de operação.

Todas as potências dos Grupos Geradores são baseadas nas seguintes condições de referência:

- Temperatura ambiente: 27°C

- Altitude acima do nível do mar: 150 metros

- Umidade relativa: 60%



Desenho meramente ilustrativo, não utilize para lay out.

**Dimensões e Pesos**

| Grupo Gerador    | Comprimento (mm)<br>L | Largura (mm)<br>W | Altura Máxima (mm)<br>H | Grupo Gerador<br>Seco (kg) | Grupo Gerador<br>Úmido <sup>1</sup> (kg) |
|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Aberto           | 3370                  | 1500              | 2017                    | 4083                       | 4633                                     |
| Carenagem - F187 | 5105                  | 1550              | 2430                    | 5220                       | 5798                                     |
| Carenagem - F188 | 6254                  | 1500              | 2690                    | 5611                       | 6161                                     |

<sup>1</sup> Peso úmido inclui o peso total do conjunto com óleo, líquido de arrefecimento e combustível.**Características do Grupo Gerador**

Motor Diesel Cummins arrefecido a água.  
Filtro de óleo e de combustível, separador de água e válvula de dreno do óleo lubrificante incorporados.  
Motor de partida elétrico e alternador em 24 Vcc.  
Governador eletrônico.  
Filtro de ar para trabalhos normais.  
Alternador com enrolamento único.  
Bateria montada na base do grupo gerador.  
Motor, Alternador, Chassis e Painel de Comando na cor: Verde Munsell Jade.  
Radiador e Proteção na cor: Preto.  
Embalagem em filme plástico retrátil.  
Manual de Operação e Manutenção.  
Etiqueta Padrão.  
Tanque incorporado na base do grupo gerador.

**PMG (Gerador Imã Permanente)**

Fornecer energia ao regulador eletrônico de tensão independente da tensão de saída do alternador. Permite com isso melhor desempenho na partida de motores e melhor efeito de harmônicas induzidas por cargas não lineares.

**Garantia Standard**

Garantia de 2 anos (Standby) ou 1 ano (Prime)

**Performance do Grupo Gerador****Regulação de Tensão**

Tensão de saída com variação de  $\pm 1,0\%$  será mantida nas seguintes condições:

1. Fator de potência entre 0,8 e 1,0.
2. Com qualquer nível de carga entre vazio e plena carga.
3. Com queda de rotação de até 4,5%.

**Regulagem de Frequência**

Isócrona sob cargas variáveis entre vazio e plena carga

**Variação Aleatória de Frequência**

Não deve exceder a  $\pm 0,25\%$  de seu valor nominal para cargas constantes entre vazio e plena carga.

**Especificações do Alternador****Tipo**

Rolamento único, sem escovas, campo rotativo, 4 pólos, tela de proteção a prova de gotejamento.  
Classe de Isolação H, Grau de Proteção IP 23.  
Impregnação a vácuo.  
Sistema de Arrefecimento IC 01.  
Enrolamento de amortecimento totalmente interconectado.  
Excitatriz de CA e unidade retificadora rotativa.  
Enrolamento do estator com revestimento Epoxy.  
Rotor e excitatriz impregnados com resina de poliéster adequada ao clima tropical, resistente a óleo e ácidos.  
Rotor balanceado dinamicamente BS 5625 grau 2,5.  
Rotor enrolado em camadas e com cunha mecânica.  
Rolamento blindado, com lubrificante permanente.

**Excitatriz**

Submersão tripla em verniz de poliéster resistente a óleo e revestido com verniz anti-rastelo.

**Enrolamento**

Enrolamento principal com passo de 2/3 para minimizar os harmônicos e melhorar a capacidade de paralelismo.  
Acoplamento do motor/alternador garante alinhamento.

**Opções do Grupo Gerador****Escapamento**

Silencioso - Industrial 9 dB(A)  
Silencioso - Hospitalar 29 dB(A)

**Garantia**

Garantia estendida de 5 anos (Standby).  
Garantia estendida de 2 anos ou 6000 horas (Prime)

**Opcionais**

Pré-Aquecimento.  
Carregador de Baterias.  
Chave de Transferência - GTEC.  
Carenagem Silenciada.  
Carenagem Super Silenciada.  
Tanque externo.

**Conexões de Tensão - 60Hz**

480/277 V 380/220 V 220/127 V  
440/254 V 240/139 V 208/120 V  
416/240 V



Cummins Brasil Ltda.  
Rua Jati, 310 - Cumbica  
Guarulhos - SP - Brasil  
CEP: 07180-900  
Telefone: (55 11) 2186-4195  
www.cumminspower.com.br

the  
Power  
of One

Consulte seu distribuidor para maiores informações

Cummins®, Cummins Power Generation®, o logo "C" e Nossa energia trabalhando por você.™, são marcas registradas de Cummins Inc.

Abril 2011 - Especificações sujeitas a alterações sem aviso prévio.

©2007 Cummins Power Generation. Todos os direitos reservados.

2 / 2

C500D6\_PT\_rev03



## ANEXO 3 – Dados de Consumo e Geração das Usinas dos Sistemas Isolados

Os dados são referentes ao mês de dezembro de 2014 (SCD, 2014).

| Usina               | Geração Térmica<br>(kWh) | Consumo<br>Combustível (L) | Consumo<br>Específico Mensal<br>(L/kWh) | Limite Consumo<br>Específico<br>ANEEL (L/kWh) | Combustível Não<br>Reembolsável -<br>Glosa (L) | Combustível<br>Reembolsável<br>(L) |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
| AFUA                | 808.235                  | 268.647                    | 0,332                                   | 0,283                                         | 39.604                                         | 229.043                            |
| ALENQUER            | 3.748.326                | 1.133.282                  | 0,302                                   | 0,283                                         | 71.218                                         | 1.062.064                          |
| ALVARÃES            | 733.404                  | 227.206                    | 0,310                                   | 0,283                                         | 19.802                                         | 207.404                            |
| ALVORADA DO OESTE   | 1.451.344                | 439.680                    | 0,303                                   | 0,283                                         | 29.027                                         | 410.653                            |
| AMATURA             | 475.281                  | 156.723                    | 0,330                                   | 0,289                                         | 19.487                                         | 137.236                            |
| ANAJÁS              | 735.763                  | 203.914                    | 0,277                                   | 0,296                                         | -                                              | 203.914                            |
| APUI                | 1.410.262                | 438.236                    | 0,311                                   | 0,283                                         | 39.487                                         | 398.749                            |
| ARARA               | 51.775                   | 18.100                     | 0,350                                   | 0,329                                         | 1.087                                          | 17.013                             |
| ASSIS BRASIL        | 522.006                  | 136.297                    | 0,261                                   | 0,289                                         | -                                              | 136.297                            |
| AUGUSTO MONTENEGRO  | 82.933                   | 30.819                     | 0,372                                   | 0,329                                         | 3.566                                          | 27.253                             |
| AUXILIADORA         | 77.495                   | 34.559                     | 0,446                                   | 0,329                                         | 9.067                                          | 25.492                             |
| AVEIRO              | 189.331                  | 53.376                     | 0,282                                   | 0,296                                         | -                                              | 53.376                             |
| BARCELOS            | 1.032.872                | 391.759                    | 0,379                                   | 0,283                                         | 99.156                                         | 292.603                            |
| BARREIRINHA         | 1.211.941                | 375.983                    | 0,310                                   | 0,283                                         | 32.722                                         | 343.261                            |
| BENJAMIN CONSTANT   | 2.540.963                | 735.686                    | 0,290                                   | 0,283                                         | 17.787                                         | 717.899                            |
| BERURI              | 1.041.033                | 228.488                    | 0,219                                   | 0,285                                         | -                                              | 228.488                            |
| BOA VISTA DO RAMOS  | 911.531                  | 311.616                    | 0,342                                   | 0,289                                         | 48.311                                         | 263.305                            |
| BORBA               | 1.951.531                | 586.645                    | 0,301                                   | 0,283                                         | 35.128                                         | 551.517                            |
| BURITIS             | 5.788.933                | 1.619.600                  | 0,280                                   | 0,253                                         | 156.301                                        | 1.463.299                          |
| CABURÍ              | 315.067                  | 101.149                    | 0,321                                   | 0,289                                         | 10.082                                         | 91.067                             |
| CAIAMBÉ             | 91.347                   | 42.603                     | 0,466                                   | 0,296                                         | 15.529                                         | 27.074                             |
| CALAMA              | 222.972                  | 68.885                     | 0,309                                   | 0,289                                         | 4.459                                          | 64.426                             |
| CAMPINAS            | 73.678                   | 24.295                     | 0,330                                   | 0,329                                         | 74                                             | 24.221                             |
| CAMPO NOVO          | 648.091                  | 198.543                    | 0,306                                   | 0,283                                         | 14.906                                         | 183.637                            |
| CANUTAMA            | 588.320                  | 189.495                    | 0,322                                   | 0,289                                         | 19.415                                         | 170.080                            |
| CAREIRO             | 700.936                  | 308.820                    | 0,441                                   | 0,283                                         | 110.748                                        | 198.072                            |
| CHAVES              | 222.807                  | 65.741                     | 0,295                                   | 0,296                                         | -                                              | 65.741                             |
| COARI               | 5.996.698                | 2.066.588                  | 0,345                                   | 0,253                                         | 551.696                                        | 1.514.892                          |
| CONCEIÇÃO DA GALERA | 8.220                    | 3.347                      | 0,407                                   | 0,300                                         | 880                                            | 2.467                              |
| COSTA MARQUES       | 1.126.375                | 385.701                    | 0,342                                   | 0,283                                         | 66.456                                         | 319.245                            |
| COTIJUBA            | 354.341                  | 94.586                     | 0,267                                   | 0,296                                         | -                                              | 94.586                             |
| CRUZEIRO DO SUL     | 11.501.900               | 3.496.300                  | 0,304                                   | 0,210                                         | 1.081.179                                      | 2.415.121                          |
| CUCUÍ               | 59.099                   | 19.430                     | 0,329                                   | 0,329                                         | -                                              | 19.430                             |
| CUJUBIM             | 2.545.127                | 736.828                    | 0,290                                   | 0,253                                         | 94.170                                         | 642.658                            |
| CURUA               | 545.294                  | 166.081                    | 0,305                                   | 0,296                                         | 4.908                                          | 161.173                            |
| DEMARCAÇÃO          | 21.461                   | 7.648                      | 0,356                                   | 0,300                                         | 1.202                                          | 6.446                              |
| DISTRITO            | 11.110.401               | 3.524.656                  | 0,317                                   | 0,210                                         | 1.188.813                                      | 2.335.843                          |
| ENVIRA              | 818.132                  | 239.405                    | 0,293                                   | 0,289                                         | 3.273                                          | 236.132                            |
| FARO                | 391.513                  | 110.685                    | 0,283                                   | 0,296                                         | -                                              | 110.685                            |
| FEIJÓ               | 1.569.590                | 462.109                    | 0,294                                   | 0,283                                         | 17.265                                         | 444.844                            |
| FONTE BOA           | 1.485.343                | 413.864                    | 0,279                                   | 0,283                                         | -                                              | 413.864                            |
| Guariba             | 306.543                  | 101.027                    | 0,330                                   | 0,289                                         | 12.568                                         | 88.459                             |
| GURUPA              | 933.358                  | 302.039                    | 0,324                                   | 0,279                                         | 42.001                                         | 260.038                            |
| HUMAITA             | 4.713.131                | 2.412.830                  | 0,512                                   | 0,283                                         | 1.079.307                                      | 1.333.523                          |
| IPIRANGA            | 33.804                   | 15.268                     | 0,452                                   | 0,329                                         | 4.158                                          | 11.110                             |
| IPIXUNA             | 573.163                  | 180.792                    | 0,315                                   | 0,289                                         | 14.902                                         | 165.890                            |
| ITACOATIARA         | 12.247.681               | 2.765.246                  | 0,226                                   | 0,253                                         | -                                              | 2.765.246                          |
| ITAPIRANGA          | 993.891                  | 302.933                    | 0,305                                   | 0,283                                         | 21.866                                         | 281.067                            |
| IZIDOLÂNDIA         | 78.347                   | 24.254                     | 0,310                                   | 0,296                                         | 1.097                                          | 23.157                             |
| JACAREACANGA        | 615.611                  | 165.605                    | 0,269                                   | 0,296                                         | -                                              | 165.605                            |
| JAPURA              | 42.513                   | 13.773                     | 0,324                                   | 0,329                                         | -                                              | 13.773                             |
| JURUTI              | 3.877.534                | 1.115.874                  | 0,288                                   | 0,283                                         | 19.388                                         | 1.096.486                          |
| LABREA              | 1.767.044                | 752.394                    | 0,426                                   | 0,283                                         | 252.687                                        | 499.707                            |
| LIMOEIRO            | 324.863                  | 121.572                    | 0,374                                   | 0,289                                         | 27.613                                         | 93.959                             |
| LOURENÇO            | 241.686                  | 69.566                     | 0,288                                   | 0,289                                         | -                                              | 69.566                             |
| MACHADINHO          | 3.777.505                | 1.213.167                  | 0,321                                   | 0,253                                         | 256.870                                        | 956.297                            |
| MAL. THAUMATURGO    | 351.485                  | 106.717                    | 0,304                                   | 0,289                                         | 5.272                                          | 101.445                            |

| Usina                      | Geração Térmica<br>(kWh) | Consumo<br>Combustível (L) | Consumo<br>Específico Mensal<br>(L/kWh) | Limite Consumo<br>Específico<br>ANEEL (L/kWh) | Combustível Não<br>Reembolsável -<br>Glosa (L) | Combustível<br>Reembolsável<br>(L) |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
| MANUEL URBANO              | 453.406                  | 133.781                    | 0,295                                   | 0,267                                         | 12.695                                         | 121.086                            |
| MATUPI                     | 768.768                  | 229.610                    | 0,299                                   | 0,283                                         | 12.300                                         | 217.310                            |
| MONTE ALEGRE               | 3.662.704                | 1.043.276                  | 0,285                                   | 0,283                                         | 7.325                                          | 1.035.951                          |
| Monte Dourado              | 1.541.815                | 440.266                    | 0,286                                   | 0,283                                         | 4.625                                          | 435.641                            |
| MUANA                      | 1.044.845                | 280.177                    | 0,268                                   | 0,283                                         | -                                              | 280.177                            |
| MURITUBA                   | 23.540                   | 11.661                     | 0,495                                   | 0,329                                         | 3.908                                          | 7.753                              |
| NAZARÉ                     | 69.280                   | 26.152                     | 0,377                                   | 0,300                                         | 5.335                                          | 20.817                             |
| NOVA CALIFÓRNIA            | 545.212                  | 162.728                    | 0,298                                   | 0,283                                         | 8.178                                          | 154.550                            |
| NOVA OLINDA DO NORTE       | 1.956.797                | 592.568                    | 0,303                                   | 0,283                                         | 39.136                                         | 553.432                            |
| NOVO REMANSO               | 1.492.313                | 516.520                    | 0,346                                   | 0,283                                         | 94.016                                         | 422.504                            |
| OBIDOS                     | 3.278.203                | 823.235                    | 0,251                                   | 0,270                                         | -                                              | 823.235                            |
| OEIRAS DO PARA             | 827.133                  | 248.996                    | 0,301                                   | 0,288                                         | 10.753                                         | 238.243                            |
| OIAPOQUE                   | 2.941.848                | 844.376                    | 0,287                                   | 0,283                                         | 11.767                                         | 832.609                            |
| ORIXIMINA                  | 4.776.438                | 1.291.502                  | 0,270                                   | 0,280                                         | -                                              | 1.291.502                          |
| PACARÃNA                   | 259.930                  | 80.208                     | 0,309                                   | 0,289                                         | 5.199                                          | 75.009                             |
| PALMEIRAS                  | 29.293                   | 14.252                     | 0,487                                   | 0,329                                         | 4.628                                          | 9.624                              |
| Paranorte                  | 93.969                   | 33.356                     | 0,355                                   | 0,289                                         | 6.202                                          | 27.154                             |
| PARAUA                     | 64.744                   | 27.932                     | 0,431                                   | 0,329                                         | 6.604                                          | 21.328                             |
| PARINTINS                  | 10.558.943               | 3.165.250                  | 0,300                                   | 0,210                                         | 950.305                                        | 2.214.945                          |
| PAUINI                     | 586.983                  | 303.119                    | 0,516                                   | 0,289                                         | 133.245                                        | 169.874                            |
| PEDRAS                     | 125.116                  | 40.152                     | 0,321                                   | 0,329                                         | -                                              | 40.152                             |
| PEDRAS NEGRAS              | 11.768                   | 4.801                      | 0,408                                   | 0,300                                         | 1.271                                          | 3.530                              |
| PONTA DE PEDRAS            | 955.542                  | 250.629                    | 0,262                                   | 0,283                                         | -                                              | 250.629                            |
| PRAINHA                    | 770.519                  | 230.873                    | 0,300                                   | 0,296                                         | 3.082                                          | 227.791                            |
| ROLIM DE MOURA DO GUAPORÉ  | 55.372                   | 20.047                     | 0,362                                   | 0,300                                         | 3.433                                          | 16.614                             |
| Rondolândia                | 205.160                  | 58.305                     | 0,284                                   | 0,289                                         | -                                              | 58.305                             |
| SACAMBÚ                    | 78.790                   | 22.959                     | 0,291                                   | 0,296                                         | -                                              | 22.959                             |
| SALVATERRA                 | 1.874.376                | 578.342                    | 0,309                                   | 0,283                                         | 48.734                                         | 529.608                            |
| SANTA CATARINA             | 14.331                   | 5.280                      | 0,368                                   | 0,300                                         | 975                                            | 4.305                              |
| SANTA CRUZ DO ARARÍ        | 298.845                  | 86.975                     | 0,291                                   | 0,296                                         | -                                              | 86.975                             |
| SANTA MARIA DAS BARREIRAS  | 198.057                  | 60.521                     | 0,306                                   | 0,296                                         | 1.981                                          | 58.540                             |
| SANTA MARIA DO BOIAÇÚ      | 50.887                   | 23.577                     | 0,463                                   | 0,329                                         | 6.819                                          | 16.758                             |
| SANTA RITA                 | 175.280                  | 79.726                     | 0,455                                   | 0,296                                         | 27.870                                         | 51.856                             |
| SANTANA                    | 25.459.559               | 5.035.589                  | 0,198                                   | 0,210                                         | -                                              | 5.035.589                          |
| SANTANA DO ARAGUAIA        | 3.323.390                | 991.093                    | 0,298                                   | 0,283                                         | 49.851                                         | 941.242                            |
| SANTANA I                  | 17.138.596               | 4.752.901                  | 0,277                                   | 0,210                                         | 1.148.286                                      | 3.604.615                          |
| SANTANA II                 | 18.227.908               | 5.011.755                  | 0,275                                   | 0,210                                         | 1.184.814                                      | 3.826.941                          |
| SANTO ANTÔNIO DO IÇÁ       | 1.105.351                | 348.786                    | 0,316                                   | 0,283                                         | 36.477                                         | 312.309                            |
| SÃO CARLOS                 | 139.869                  | 40.402                     | 0,289                                   | 0,289                                         | -                                              | 40.402                             |
| SÃO FRANCISCO              | 2.463.635                | 786.155                    | 0,319                                   | 0,283                                         | 88.691                                         | 697.464                            |
| SÃO GABRIEL DA CACHOEIRA   | 2.756.348                | 843.324                    | 0,306                                   | 0,283                                         | 63.396                                         | 779.928                            |
| SÃO JOÃO DA BALIZA         | 1.409.938                | 473.657                    | 0,336                                   | 0,283                                         | 74.727                                         | 398.930                            |
| SÃO PAULO DE OLIVENÇA      | 943.368                  | 278.722                    | 0,295                                   | 0,283                                         | 11.320                                         | 267.402                            |
| SÃO SEBASTIÃO DA BOA VISTA | 1.006.035                | 326.573                    | 0,325                                   | 0,296                                         | 29.175                                         | 297.398                            |
| SÃO SEBASTIÃO DO UATUMÃ    | 609.676                  | 187.848                    | 0,308                                   | 0,285                                         | 14.023                                         | 173.825                            |
| SILVES                     | 599.198                  | 187.272                    | 0,313                                   | 0,283                                         | 17.976                                         | 169.296                            |
| SOURE                      | 1.746.404                | 555.069                    | 0,318                                   | 0,283                                         | 61.124                                         | 493.945                            |
| sucundurí                  | 48.973                   | 18.000                     | 0,368                                   | 0,329                                         | 1.910                                          | 16.090                             |
| SURPRESA                   | 70.321                   | 24.775                     | 0,352                                   | 0,300                                         | 3.657                                          | 21.118                             |
| TAPAUÁ                     | 831.709                  | 330.941                    | 0,398                                   | 0,283                                         | 95.647                                         | 235.294                            |
| TARAUACÁ                   | 1.952.390                | 762.075                    | 0,390                                   | 0,283                                         | 208.906                                        | 553.169                            |
| TEFÉ                       | 6.846.037                | 2.015.041                  | 0,294                                   | 0,253                                         | 280.688                                        | 1.734.353                          |
| TERRA SANTA                | 1.259.626                | 386.288                    | 0,307                                   | 0,283                                         | 30.231                                         | 356.057                            |
| TUBARÃO                    | 1.388.985                | 392.187                    | 0,282                                   | 0,283                                         | -                                              | 392.187                            |
| UARINÍ                     | 721.302                  | 221.019                    | 0,306                                   | 0,289                                         | 12.262                                         | 208.757                            |
| UIRAMUTÃ                   | 106.149                  | 36.950                     | 0,348                                   | 0,296                                         | 5.520                                          | 31.430                             |
| URUCARÁ                    | 1.324.089                | 435.351                    | 0,329                                   | 0,283                                         | 60.908                                         | 374.443                            |
| URUCUMACUÃ                 | 126.817                  | 42.809                     | 0,338                                   | 0,296                                         | 5.326                                          | 37.483                             |
| URUCURITUBA                | 1.045.244                | 334.267                    | 0,320                                   | 0,289                                         | 32.403                                         | 301.864                            |
| VALE DO ANARI              | 838.358                  | 257.509                    | 0,307                                   | 0,283                                         | 20.121                                         | 237.388                            |
| VILA DE LINDOIA            | 313.459                  | 96.659                     | 0,308                                   | 0,289                                         | 5.956                                          | 90.703                             |
| VILA EXTREMA               | 943.629                  | 282.768                    | 0,300                                   | 0,283                                         | 16.042                                         | 266.726                            |
| VILA SURUMÚ                | 45.182                   | 17.735                     | 0,393                                   | 0,296                                         | 4.383                                          | 13.352                             |
| VISTA ALEGRE DO ABUNÃ      | 1.339.915                | 385.264                    | 0,288                                   | 0,265                                         | 30.818                                         | 354.446                            |
| ALCOA BENEFICIAMENTO       | 3.465.392                | 906.533                    | 0,262                                   | 0,279                                         | -                                              | 906.533                            |