



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS FÍSICAS APLICADAS

JOSÉ STÊNIO ROCHA

ANÁLISE DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE
SISTEMAS HÍBRIDOS COMO ALTERNATIVA PARA
ELETRIFICAÇÃO DO MEIO RURAL: estudo de caso
para Pentecoste-CE

FORTALEZA – CEARÁ
2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

JOSÉ STÊNIO ROCHA

ANÁLISE DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE
SISTEMAS HÍBRIDOS COMO ALTERNATIVA PARA
ELETRIFICAÇÃO DO MEIO RURAL: estudo de caso
para Pentecoste-CE

Dissertação submetida à Coordenação do
Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da
Universidade Estadual do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Co-orientador:

Prof. Dr. Antonio Carlos Santana dos Santos

FORTALEZA - CEARÁ
2010

R672a Rocha, José Stênio
ANÁLISE DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE SISTEMAS
HÍBRIDOS COMO ALTERNATIVA PARA ELETRIFICAÇÃO DO
MEIO RURAL: estudo de caso para Pentecoste-CE. - Fortaleza,
Ceará, 2010.
132p.; il.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas
Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de
Ciências e Tecnologia.

1. Sistemas híbridos. 2. Energia solar fotovoltaica. 3.
Energia eólica. 4. Eletrificação rural. 5. Modelagem numérica. 6.
Simulação computacional de sistemas híbridos. 7. Viabilidade
financeira de projetos. I. Universidade Estadual do Ceará,
Centro de Ciências e Tecnologia.

CDD: 333.79.3

JOSÉ STÊNIO ROCHA

ANÁLISE DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS COMO
ALTERNATIVA PARA ELETRIFICAÇÃO DO MEIO RURAL: estudo de caso para
Pentecoste-CE

Dissertação submetida à Coordenação do
Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da
Universidade Estadual do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Aprovada em 31/03/2010

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará - UFC
Presidente

Prof. Dr. Antonio Carlos Santana dos Santos
Universidade Estadual do Ceará – UECE
Membro

Prof. Dr. Francisco Sales Ávila Cavalcante
Universidade Estadual do Ceará – UECE
Membro

Prof. Dr. João José Hiluy Filho
Universidade Federal do Ceará – UFC
Membro

Aos meus pais, esposa,
filhos, irmãos, sobrinhos,
professores, alunos, amigos
e colegas do MCFA e de
ideal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por tudo, lições e aprendizados...

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho pela orientação, ensinamentos, boa vontade e visão estratégica para eletrificação com ênfase em fontes alternativas e renováveis de energia.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Santana dos Santos pela co-orientação, ensinamentos, infra-estrutura e suporte na modelagem numérico-computacional para geração de estimativas de potenciais solar e eólico do Ceará.

Ao Prof. Dr. Francisco Sales Ávila Cavalcante pelos ensinamentos de planejamento energético, seminários multidisciplinares e apoio institucional.

Ao Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira, pelos ensinamentos, idéias, perspectivas, questões e sugestões no contexto do MCFA.

Ao Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva, pelos vários ensinamentos e disponibilizar estrutura computacional para os experimentos desta Dissertação.

Ao Corpo Docente do MCFA, pelos ensinamentos teóricos e práticos.

Aos amigos e colegas de estudos e trabalhos de pesquisa junto ao MCFA, Francisco Anderson de Souza Lima, Francisco das Chagas Júnior e demais amigos.

À Coordenação, ao Secretariado do MCFA, em especial à Graça Guimarães, por todo empenho, boa vontade e trabalho em prol do MCFA.

À FUNCEME, através dos colegas Bosco, Otacílio e Paulo Henrique.

Ao Eng. Paulo Marques Aragão Craveiro por compartilhar dados técnicos relevantes de projetos de Fontes Alternativas e Conservação de Energia.

Aos Agrônomos Carlos Roberto de Sousa Gomes, e Helano Luz Lopes, ao Zootecnista Adriano Batista, promotores do desenvolvimento sustentável através do PRECE e da ADEL, pela ajuda prestada na pesquisa de campo desta dissertação. Aos membros das comunidades rurais de Irapuá, Cacimbas e Canfístula, e ao Presidente da Associação de Caprinocultores de Canafístula, Sr. Gilberto, pelas as informações, hospitalidade, motivação e boas expectativas.

À FUNCAP, pelo patrocínio através de bolsa de estudos de mestrado.

Aos meus pais, irmãos, esposa, filhos, sobrinhos e amigos, pelo amor, apoio, companheirismo, esperança e motivação, dentre outros. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão e sucesso desta dissertação.

*“Louvado sejas, meu Senhor
Com todas as tuas criaturas.
Especialmente o irmão Sol...
Pelo irmão Vento...
Pelo ar, nublado...
... o tempo...
Pela irmã Água...
Por nossa irmã, a Mãe Terra
Que nos sustenta...
E produz frutos diversos...”.*

Francisco de Assis

RESUMO

A energia é necessária para transformar recursos materiais em produtos e serviços que beneficiam a sociedade. Ela está presente em nosso cotidiano sob várias formas, sendo a eletricidade a forma mais comum e inter-relacionada com a atual sociedade. Sua crescente demanda justifica investimentos em pesquisa de projetos de eletrificação a partir de fontes alternativas e renováveis. Os potenciais solar e eólico podem mostrar-se interessantes para geração de energia elétrica. A combinação de uma ou mais fontes de energia para eletrificação caracteriza um sistema híbrido, que pode este apresentar vantagens em relação aos sistemas singelos e convencionais. As tecnologias convencionais de eletrificação a partir de extensão de rede e geração a óleo Diesel apresentam consolidação no mercado de energia. A extensão de rede apresenta elevados custos de implantação e baixos custos operacionais, enquanto que a geração a partir do óleo Diesel, baixos custos de implantação, mas elevados custos operacionais. O uso biodiesel (B2) pode trazer vantagens na substituição do Diesel. Através de pesquisas de campo, foi feita uma análise da demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste. Os potenciais solar e eólico da respectiva região foram estimados com o auxílio computacional dos programas de modelagem numérica RAMS, de visualização de dados numéricos (de radiação solar e velocidade do vento) FERRET. O potencial de biodiesel foi estimado a partir de publicações científicas. As configurações, simulações e seleção de sistemas híbridos foram feitas com auxílio computacional do programa HOMER para atendimento através de. A comunidade rural de Irapuá apresenta uma demanda diária média de eletricidade de 258,2 kWh/dia, uma potência média de 10 kW, e uma potência de pico de 28 kW. A apresentou estimativas de potencial solar anual médio de 5,205 kWh/m²/dia, e uma velocidade média de vento de 4,84 m/s a 10 metros acima do solo da região de Pentecoste, os quais foram calculados com o suporte computacional do RAMS e FERRET. A seleção da melhor configuração do sistema híbrido foi feita com o auxílio do HOMER, a partir de especificações técnicas e custos de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, conversor/inversor de potência, banco de baterias, grupo gerador a biodiesel (B2) e extensão de rede elétrica de distribuição. São apresentados uma análise de viabilidade financeira do sistema híbrido selecionado, da produção de energia elétrica, e estimativas de emissões de gases de efeito estufa relacionados. Conclusões, sugestões e perspectivas de pesquisas futuras também são apresentadas.

Palavras-chave: Sistemas híbridos, Geração solar fotovoltaica, Geração eólica, Eletrificação rural, Simulação computacional, Viabilidade financeira de projetos.

ABSTRACT

The energy is necessary to transform material resources in products and services that benefit the society. It is present in our day by day under several forms, being the electricity the most common form and interrelated with the current society. It is crescent demand justifies investments in research of electrification projects starting from alternative and renewable sources. The solar and wind potentials can be shown interesting for electric power generation. The combination of an or more sources of energy for electrification characterize a hybrid system, that it is able this to present advantages in relation to the simple and conventional systems. The conventional technologies of electrification starting from net extension and generation to Diesel oil present consolidation in the market of energy. The net extension presents high implantation costs and low operational costs, while the generation starting from the Diesel oil, presents low implantation costs, but high operational costs. The use of biodiesel (B2) can brings advantages in the substitution of the Diesel oil. Through field researches, it was made an analysis of the electrical demand of the rural community's of Irapua of the Pentecoste municipal district of Ceara state. The solar and wind potentials were esteemed with the computational aid of the program of numeric modelling RAMS, the program FERRET for the visualization of the numerics data of the solar radiation and the wind speed. The biodiesel potential was esteemed by scientific publications. The configurations, simulations and selection of hybrid systems were made with aid computational of the program HOMER. The rural community of Irapua presents a demand medium daily rate of electricity of 258,2 kWh/day, a medium potency of 10 kW, and a potency of pick of 28 kW. It's estimates of annual solar potential medium was 5,205 kWh/m²/day, and the medium wind speed was 4,84 m/s for 10 meters above the area of Pentecoste, which the calculations were made with the computational aid of RAMS and FERRET. The selection of the best configuration of the hybrid system was made with aid HOMER program, by the technical specifications and costs of photovoltaic panels, wind turbines, power converter, bank of batteries, biodiesel (B2) power generator and extension of electric net. They are presented an analysis of financial viability of the selected hybrid system, of the electric power production, and estimates of emissions of gases of related greenhouse effect. Conclusions, suggestions and perspectives for future researches are presented too.

Word-key: Hybrid systems, Generation solar (photovoltaic), Wind power generation, Rural Electrification, Computational Simulation, Financial viability of projects.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADEL – AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO LOCAL

ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)

B2 – Mistura de bicomcombustível composta de 98% de óleo Diesel e 2% de Biodiesel

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento

BT - Linhas de transmissão de baixa tensão

CCC - Conta de Consumo de Combustível

CDE - Conta de Desenvolvimento Energético

CE - Comércio de Emissões

COELCE - Companhia Energética do Ceará

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

FAO - *Food and Agriculture Organization*

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

GEE - Gases de Efeito Estufa

GEER - Grupo Executivo de Eletrificação Rural

GNESD - *Global Network on Energy for Sustainable Development*

GPS - *Global Positioning System*

HOMER - *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - Índices de Desenvolvimento Humano

INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPH - Índice de Pobreza Humana

MCFA – Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas

MDL - Mecanismo do Desenvolvimento Limpo

MME – Ministério de Minas e Energia

NCEP/NCAR – *NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION/THE
NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH*

NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

NEB – Nordeste do Brasil

O&M – Operação e Manutenção

PBDCE - Programa de Biodiesel do Ceará

PCDs – Plataforma de Coleta de Dados

PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas

PLPT – Programa Luz Para Todos

PNE 2030 – Plano Nacional de Energia 2030

PNER - Programa Nacional de Eletrificação Rural

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PRECE – Programa de Educação em Células

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODEEM - Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar

RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System*

RGR - Reserva Global de Reversão

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIGIFs - Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes

SIN - Sistema Interligado Nacional

TSBR – Tarifa Social Baixa Renda

UECE – Universidade Estadual do Ceará

UFC – Universidade Federal do Ceará

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Intensidade Percentual da Pobreza nos Estados do Brasil.....	29
Figura 2 - Percentual de pessoas que vivem no Brasil em domicílios com energia elétrica	31
Figura 3 - Percentual de pessoas no Brasil com renda per capita abaixo de R\$ 75,00.....	31
Figura 4 – Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) Brasileiro.....	32
Figura 5 – Correlação entre o IDH e o Percentual de brasileiros que vivem em domicílios com energia elétrica nos Estados do Brasil.	32
Figura 6 – Correlação entre Variação do PIB e a Variação do Consumo de energia elétrica no Brasil, em US\$/MWh	33
Figura 7- Evolução do consumo de energia elétrica (GWh) no Ceará de 1993 e 2007	34
Figura 8 - Estimativa da evolução do consumo de eletricidade do Estado do Ceará,	34
Figura 9 - Representação simplificada de um Sistema Elétrico: geração, transmissão, distribuição e utilização.	37
Figura 10 - Representação esquemática da célula solar fotovoltaica.....	54
Figura 11 - Representação da curva I(V) de um diodo de silício.	54
Figura 12 - Representação do circuito equivalente da célula solar fotovoltaica	55
Figura 13 - Representação da curva de Tensão-Corrente de uma célula fotovoltaica.....	57
Figura 14 - Representação da curva de Tensão-Potência de uma célula fotovoltaica.....	58
Figura 15 - Representação da curva de máxima potência do painel fotovoltaico.....	58
Figura 16 - Radiação solar média (kWh/m ² /ano) do Brasil	60
Figura 17 - Radiação solar média (kWh/m ² /ano) da Alemanha	60
Figura 18 - Potencial da radiação solar no Ceará	61
Figura 19 - Conjunto de painéis fotovoltaicos instalados nas dependências do MCFA/UECE, Campus do Itaperi.	63
Figura 20 - Potencial eólico do Brasil	66
Figura 21 - Representação de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	69
Figura 22 - Aplicação do aerogerador ENERSUD GERA246 de 1 kW de potência em pesquisa de desempenho em bombeamento d'água e armazenamento de energia potencial hidráulica do Laboratório de Energias Alternativas da UFC.....	70
Figura 23 - Curva de Potência do Aerogerador ENERSUD de 1kW.....	70
Figura 24 - Curva de Produção de Energia do Aerogerador ENERSUD de 1kW	71
Figura 25 - Distribuições de Weibull para estimativa da velocidade do vento	72
Figura 26 - Representação do melhor ajuste através da distribuição de Weibull	72
Figura 27 - Análise comparativa entre os métodos logarítmico e de potência para estimativa da velocidade do vento em função da altura acima do solo.....	73

Figura 28 - Alguns dos equipamentos utilizados em aplicações de sistema híbridos junto ao Laboratório de Energias Alternativas da UFC.	76
Figura 29 - Representação do fluxo de caixa ao longo tempo.....	83
Figura 30 – Representação das Plataformas de Coleta de Dados da FUNCEME no Ceará.....	87
Figura 31 - Caracterização geográfica da região de Pentecoste-CE.....	90
Figura 32 - Caracterização da rede de média tensão (em azul) no Ceará (SEINFRA, 2010).....	90
Figura 33- Caracterização geográfica da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE	91
Figura 34 - Estimativa do Potencial Solar de Pentecoste-CE, em 15/01/2010.	93
Figura 35 – Representatividade anual da velocidade do vento (m/s) a 10 m acima do nível do solo da região de Pentecoste-Ce.	94
Figura 36 – Curva de potência típica média do grupo G30, obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	102
Figura 37 - Curva de potência típica média do grupo G90 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	103
Figura 38 - Curva de potência típica média do grupo G120 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	103
Figura 39 - Curva de potência típica média do grupo G150 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	104
Figura 40 - Curva de potência típica média do grupo G180 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	104
Figura 41 - Curva de potência típica média do grupo G220 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	105
Figura 42 - Curva de potência típica média do grupo G350 obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.....	105
Figura 43 - Curva de potência típica média da comunidade rural de Irapuá (Pentecoste-CE) estimada em função das faixas de consumo verificadas e respectivos percentuais obtidos na pesquisa de campo junto à referida comunidade, em 15/02/2010.	106
Figura 44 - Configuração inicial do Sistema Híbrido simulado para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, conforme tabela 16.....	108
Figura 45 - Configuração de melhor viabilidade financeira para o Sistema Híbrido simulado para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE.	109

Figura 46 - Análise comparativa entre o Custo Presente Total do Sistema e a Produção Elétrica Total do Sistema Híbrido.	110
Figura 47 - Produção mensal média de eletricidade pelo sistema híbrido a partir de velocidade de vento de 4 m/s.	113
Figura 48 - Produção mensal média de eletricidade pelo sistema híbrido a partir de velocidade de vento de 5 m/s.	113
Figura 49 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	127
Figura 50 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento (m/s por dia) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	127
Figura 51 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de fevereiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	128
Figura 52 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento (m/s por dia) no Ceará para o mês de fevereiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	128
Figura 53 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de agosto, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	129
Figura 54 - Estimativa da Radiação Solar (W/m^2) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e FERRET.	130
Figura 55 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento ($W/m^2/dia$) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e FERRET.	130
Figura 56 - Estimativa da Radiação Solar (W/m^2) no Ceará para o mês de abril, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	131
Figura 57 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento ($W/m^2/dia$) no Ceará para o mês de abril, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	131
Figura 58 - Estimativa da Radiação Solar (W/m^2) no Ceará para o mês de setembro, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	132
Figura 59 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento ($W/m^2/dia$) no Ceará para o mês de setembro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.	132

LISTA DE SÍMBOLOS

AC – Corrente alternada

DC – Corrente contínua

I_D – Corrente do diodo

I_{mp} – Corrente no ponto de máxima potência

I_{SC} - Corrente de curto-circuito

I_S - Corrente da fonte de corrente gerada pela Cfv

I_Z - Corrente da carga de impedância Z

O&M – Operação e manutenção

P_{mp} – Potência no ponto de máxima potência

rshort - radiação solar de ondas curtas (W/m^2)

V_D – Tensão do diodo (Volt)

V_{mp} – Tensão no ponto de máxima potência (Volt)

V_{oc} – Tensão de circuito aberto (Volt)

V_Z – Tensão da carga de impedância Z (Volt)

∇ - Operador diferencial vetorial

u – componente zonal (leste/oeste) do vento

v – componente meridional (norte/sul) do vento

w – componente vertical do vento

t – Intervalo de tempo

x - Distância longitudinal (Leste-Oeste)

y - Distância latitudinal (Norte-Sul)

z - Altura (vertical)

V - Volume da massa da mistura

f - Parâmetro de *Coriolis*, $2\Omega \sin\phi$

g - Aceleração da gravidade da Terra

k_m - Coeficiente de viscosidade para quantidade de movimento

k_h - Coeficiente de viscosidade para o calor e umidade

r_n - razão de mistura da água

θ_i - Temperatura potencial da água líquida e do gelo

ρ - densidade

p - pressão

π - Função de Exner,

C_p - Calor específico do ar a volume constante

p_0 - Escala sinótica da função Exner

p' - Perturbação da função Exner

R - Constante dos gases

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística do Consumo de Energia Elétrica no Brasil nos anos de 2008 e 2009	34
Tabela 2 - Tarifas médias de consumo de eletricidade por classe de consumo e regiões do Brasil em 2008 (US\$/MWh). Erro! Indicador não definido.	
Tabela 3 - Resumo de Sistemas Fotovoltaicos instalados de Dez/1999 a Nov/2004 no Ceará através do PRODEEM.....	40
Tabela 4 - Custo da Extensão de Rede no Meio Rural em Função do Número de Residências e do Prolongamento da Rede Elétrica.	47
Tabela 5 - Principais vantagens e limitações da extensão da rede	48
Tabela 6 - Principais vantagens e limitações da geração a partir do óleo Diesel e/ou biodiesel.	51
Tabela 7 - Definições das variáveis utilizadas no modelo RAMS (COSTA, 2003; TRIPOLI e COTTON, 1982; PIELKE, 1984).	80
Tabela 8 - Principais Características das Oleaginosas Brasileiras.....	95
Tabela 9 - Principais Características das Oleaginosas Brasileiras.....	95
Tabela 10 - Sumário de características técnico-finaceiras dos recursos tecnológicos utilizado nas simulações.....	96
Tabela 11 - Sumário de custos dos combustíveis utilizados nas simulações.....	97
Tabela 12 - Sumário de custos da extensão de rede de distribuição elétrica praticadas pela concessionária local.	97
Tabela 13 - Especificação dos grupos e respectivas faixas de consumo de eletricidade na comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-Ce, em 15/01/2010.....	100
Tabela 14 - Potência nominal dos equipamentos elétricos instalados junto a comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, em 15/01/2010.	101
Tabela 15 – Caraterísticas técnicas estimadas para tarifação da energia elétrica para a comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-Ce.	106
Tabela 16 – Estimativas de dimensionamento de componentes do sistema híbrido em função das estimativas de potências média diária e pico da comunidade rural de Irapuá (Pentecoste-CE), em 15/01/2010.	107

Tabela 17 - Resultados gerais estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste-CE, em 15/01/2010.....	109
Tabela 18 – Análise comparativa dos resultados estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, a partir dos dados da pesquisa de campo e de uma velocidade média de vento de 4 m/s	111
Tabela 19 – Análise comparativa dos resultados estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, a partir dos dados da pesquisa de campo e de uma	112
Tabela 20 – Análise comparativa da produção de eletricidade pelo sistema híbrido em velocidades média de vento de 4 m/s, conforme figura 46, e 5 m/s, conforme figura 47.....	114
Tabela 21 - Sumário de Custos do Sistema Híbrido para eletrificação alternativa para a Comunidade Rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/01/2010, na condição de de velocidade de vento de 4 m/s.....	114
Tabela 22 - Sumário de Custos do Sistema Híbrido para eletrificação alternativa para a Comunidade Rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/01/2010, na condição de de velocidade de vento de 5 m/s.....	115
Tabela 23 - Análise comparativa de emissões de poluentes e gases de efeito estufa pelo sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, 15/01/2010.....	115
Tabela 24 – Relação dos Estados do Brasil com seus respectivos Percentuais de Brasileiros com renda per capita abaixo de R\$ 75,50, com o Percentual de Domicílios com eletricidade e com o Índice de Desenvolvimento Humano dos Estados Brasileiros	126

LISTA DE EQUAÇÕES

1 - Quantidade de Energia em n fótons	52
2 - Estimativa da corrente elétrica através do diodo (I_d)	55
3 - Diferença de potencial sobre os terminais do diodo (V_d).....	56
4 - Diferença de potencial V_z sobre a carga Z	56
5 - Corrente I_z que flui através da carga de impedância Z	56
6 - Potência da carga em paralelo Z_p (P_z).....	56
7 - Corrente de curto-circuito I_{sc}	56
8 - Tensão de circuito aberto V_{oc}	57
9 - Potência máxima em função da corrente máxima e tensão máxima	57
10 - Fator de qualidade da célula fotovoltaica, F_q	58
11 - Estimativa da energia a ser produzida pelo painel fotovoltaico	59
12 - Estimativa da velocidade do vento como função logarítmica	73
13 - Estimativa da velocidade do vento como função de potência	73
14 - Estimativa da energia cinética E_c da massa de ar em movimento	66
15 - Estimativa da potência elétrica disponível em Watts	67
16 - Estimativa da produção total de energia elétrica de uma fonte eólica	67
17 - Frequência relativa de cada classe de velocidade do vento	67
18 - Distribuição de Weibull para velocidades de vento	71
19 – Equação geral da Conservação da quantidade de movimento do vento	79
20 – Equação da conservação da quantidade de movimento da componente zonal do vento	79
21 – Equação da conservação da quantidade de movimento da componente meridional do vento	79
22 – Equação da conservação da quantidade de movimento da componente vertical do vento.....	79
23 – Equação da conservação da energia	80
24 – Equação da conservação da razão de mistura	80
25 – Equação da conservação da massa	80
26 – Valor futuro V_F em função do valor presente V_P e do tempo n	83
27 – Somatório do Valor futuro V_F ao longo do tempo	84
28 – Soma dos termos de uma Progressão Geométrica	84
29 – Generalização do valor futuro V_F	84
30 – Fator de recuperação do capital FRC	84
31 – Fator do valor presente em função do FRC	84
32 – Valor presente líquido VPL	84
33 – taxa interna de retorno TIR	85
34 – Tempo de retorno simples	85
35 – Tempo de retorno	85
36 – Custo da Energia Produzida pelo sistema	86

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	16
LISTA DE TABELAS.....	18
LISTA DE EQUAÇÕES	20
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA PESQUISADO	24
1.2 JUSTIFICATIVA.....	24
1.3 OBJETIVO	25
1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO.....	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO DA ELETRIFICAÇÃO NO BRASIL.....	27
2.1 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	36
2.2 PRINCIPAIS PROGRAMAS PARA UNIVERSALIZAÇÃO ELETRICIDADE NO BRASIL.....	38
2.2.1 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL):	38
2.2.2 Programa Nacional de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM):	39
2.2.3 Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA):.....	41
2.2.4 Tarifa Social Baixa Renda (TSBR):	41
2.2.5 Programa “Luz Para Todos” (PLPT).....	42
2.3 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE ELETRIFICAÇÃO DO NO MEIO RURAL...	45
2.3.1 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE EXTENSÃO DE REDE ELÉTRICA.....	46
2.3.2 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERADOR A DIESEL E/OU BIODIESEL B2.....	48
2.3.3 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERAÇÃO SOLAR.....	52
2.3.4 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERAÇÃO EÓLICA.....	64
2.3.5 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE SISTEMAS HÍBRIDOS.....	75
2.4 INTRODUÇÃO AO MODELO NUMÉRICO RAMS.....	78
2.5 INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE VISUALIZAÇÃO <i>FERRET</i>	81
2.6 INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS HOMER	82
2.7 ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE PROJETOS.....	82
2.7.1 O Fluxo de Caixa	83
2.7.2 O Valor Presente Líquido	84
2.7.3 A Taxa Interna de Retorno.....	85

2.7.4 O Tempo de Retorno do Capital	85
2.7.5 O Custo da Energia Elétrica Produzida.....	86
3 MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS NA ANÁLISE DO POTENCIAL DE UM SISTEMA HÍBRIDO CAPAZ DE ELETRIFICAR DE FORMA ALTERNATIVA UMA COMUNIDADE RURAL	87
3.1 ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DA CURVA DE POTÊNCIA ELÉTRICA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ, PENTECOSTE-CE.....	88
3.2 ANÁLISE DOS POTENCIAIS SOLAR, EÓLICO E BIODIESEL (B2) DA REGIÃO DE PENTECOSTE-CE	92
3.2.1 ESTIMATIVA DO POTENCIAL SOLAR DE PENTECOSTE.....	92
3.2.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO DE PENTECOSTE	94
3.2.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIODIESEL DE PENTECOSTE	95
3.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA DO SISTEMA HÍBRIDO	96
3.4 ESPECIFICAÇÃO, ANÁLISE, SIMULAÇÃO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA HÍBRIDO PARA ELETRIFICAÇÃO ALTERNATIVA DE IRAPUÁ.....	97
4 RESULTADOS	99
4.1 ESPECIFICAÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA MÉDIA DIÁRIA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ, PENTECOSTE-CE.....	101
4.2 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO PARA ELETRIFICAÇÃO ALTERNATIVA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ.....	107
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	116
REFERÊNCIAS.....	119
ANEXOS:.....	125
Anexo 1: Tabela 24 – Relação dos Estados do Brasil com seus respectivos Percentuais de Brasileiros com renda per capita abaixo de R\$ 75,50, com o Percentual de Domicílios com eletricidade e com o Índice de Desenvolvimento Humano dos Estados Brasileiros	126
Anexo 2: Visualização da estimativa do potencial eólico do Ceará, calculados com auxílio do RAMS e FERRET, conforme figuras 56 e 57.....	127
Anexo 3: Visualização da estimativa de radiação solar do Ceará para os meses de janeiro, abril e setembro, calculados com auxílio do RAMS e FERRET, respectivamente conforme figuras 54, 56 e 58, respectivos perfis.....	130
Anexo 4: Pesquisas acadêmicas desenvolvidas durante o Mestrado.....	133

1 INTRODUÇÃO

A energia é comumente definida como a “medida da capacidade de realizar trabalho”¹, é necessária para transformar recursos em bens e/ou serviços que beneficiam a sociedade “moderna”. É freqüentemente associada ao conceito de potência, fluxo de energia ao longo do tempo (MARQUES *et al*, 2006). E pode ser encontrada sob várias formas, radiação solar, química, nuclear, térmica, mecânica e elétrica, dentre outras (RESNICK e HALLIDAY, 1984).

A energia solar é responsável por diversos processos de transformação energética que ocorrem na Terra, desde a fotossíntese, vários fenômenos atmosféricos, a exemplo da movimentação das massas de ar que determinam o potencial eólico de uma região geográfica, até mesmo na formação dos combustíveis fósseis, sendo estes basicamente resultantes do processo de decomposição de matéria orgânica há milhões de anos.

A energia elétrica é atualmente, dentre as várias formas de energia, a mais comumente utilizada, e está inter-relacionada com o modo de vida da sociedade atual (HINRICHS, 2003).

E sua disponibilidade de eletricidade é prioritária para desenvolver a qualidade de vida da sociedade atual, a ponto de que os países com políticas públicas sérias têm trabalhado para aumentar o uso da mesma para redução substancial da pobreza (SAGHIR e JAMAL, 2005).

O Brasil, “país tropical, abençoado por Deus, bonito”², e “gigante pela própria natureza”³, é infelizmente acometido de uma pobreza de amplas dimensões, capaz de prejudicar seu processo de desenvolvimento sócio-econômico, tecnológico, e ainda ameaçar sua conservação ambiental.

Tal pobreza decorre parcialmente do deficiente aproveitamento dos recursos disponíveis, e da ainda não efetiva universalização da eletricidade. Este contexto pode ser melhorado com políticas públicas sérias capazes de fornecer os meios para que o cidadão alcance de fato a cidadania e a inclusão social, a partir da sustentabilidade de projetos de eletrificação capazes uso equilibrado do meio

¹ A relação entre trabalho e energia é deduzida da segunda lei de Newton (Física Vol. I, Cap. 7, RESNICK e HALLIDAY, 1984)

² Composição “País Tropical” de Jorge Ben Jor, gravada em 1969.

³ Hino Nacional do Brasil, popularizado em 1931 e oficializado em 1971, autoria de Joaquim Osório Duque Estrada.

ambiente, geração de emprego, renda, qualidade de vida e desenvolvimento sócio-econômico (RODRIGUES, 2006).

A importância do estudo de viabilidade de um sistema híbrido solar fotovoltaico, eólico e biodiesel B2 para eletrificação rural se insere no contexto da universalização de uso e serviços básicos de energia elétrica para atendimento da demanda de eletricidade de comunidades de baixa renda no Estado do Ceará (CARVALHO e COELHO JUNIOR, 2007).

1.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA PESQUISADO

A disponibilidade adequada de energia elétrica é imprescindível para o pleno atendimento de sua demanda, juntamente com políticas de geração de emprego e renda têm prioritária importância na promoção do desenvolvimento sócio-econômico de qualquer Estado. Os potenciais de energias solar e eólica disponíveis no Brasil, em particular no Ceará, podem contribuir para promover empreendimentos capazes de gerar produtos e serviços em benefício da sociedade e do Estado (CARVALHO, 2003).

Neste contexto, o problema pesquisado é basicamente conhecer a viabilidade de um sistema híbrido solar fotovoltaico, eólico e biodiesel B2 capaz de atender de forma alternativa a demanda de eletricidade de comunidades rurais do Estado do Ceará, a partir da especificação dos potenciais de radiação solar e eólico das referidas localidades. E assim, buscar alternativas capazes de promover o desenvolvimento sócio-econômico e da qualidade de vida de comunidades rurais do Estado do Ceará.

1.2 JUSTIFICATIVA

O foco desta dissertação é apresentar um estudo de caso com os resultados de uma análise comparativa entre os custos dos diversos sistemas utilizados para eletrificação de comunidades rural de baixa renda localizadas no município cearense de Pentecoste, cuja sede localiza-se geograficamente no ponto de latitude 3° 47'34" Sul e de longitude 39° 16'13" Oeste.

Esta dissertação espera contribuir, mesmo que parcialmente, com a redução do êxodo rural, da emissão dos gases de efeito estufa, com o desenvolvimento sócio-econômico e tecnológico do Ceará, com o programa de universalização do uso da energia elétrica através do uso de energias renováveis e da promoção da geração de energia elétrica para suprimento de comunidades rurais isoladas da rede elétrica convencional. Buscar ainda contribuir para melhorar a qualidade de vida da sociedade do Estado do Ceará, proporcionar redução dos custos de eletrificação, com ênfase nas comunidades rurais cearenses.

A presente dissertação justifica-se basicamente por considerar a eletricidade como sendo a infra-estrutura capaz de promover o desenvolvimento sócio-econômico de regiões ainda não interligadas à rede elétrica do Estado do Ceará. Prioriza o meio rural por este apresentar os menores índices de desenvolvimento humano e os maiores percentuais de domicílios sem eletricidade no Brasil.

1.3 OBJETIVO

Conhecer e estimar os potenciais solar e eólico do município de Município cearense de Pentecoste, conhecer e especificar sua demanda de energia elétrica e traçar seu perfil de consumo diário e mensal em uma comunidade rural de Irapuá do respectivo município, dimensionar um sistema híbrido capaz de suprir a demanda de eletricidade da referida comunidade são os objetivos básicos desta dissertação.

Esta dissertação objetiva basicamente contribuir para o desenvolvimento sócio-econômico do Estado do Ceará, para a melhoria da qualidade de vida de seus habitantes através da proposta de aplicação do potencial de um sistema híbrido capaz de eletrificar, de forma financeiramente viável, uma comunidade do meio rural cearense.

1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está constituída de introdução, contendo a definição do problema pesquisado, sua justificativa e objetivo, e mais três capítulos, nos quais

são apresentados o referencial teórico, a descrição da metodologia de desenvolvimento, resultados, as conclusões e as referências bibliográficas de sistemas híbridos para eletrificação alternativa do meio rural, com ênfase no estudo de caso para Pentecoste-CE.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico das tecnologias de suprimento de eletricidade no meio rural, identificando suas principais vantagens e limitações. Faz uma breve abordagem dos estudos relevantes sobre a extensão da rede elétrica convencional, a eletrificação a partir do Diesel e biodiesel B2, a geração solar, eólica e a tecnologia de sistemas híbridos para geração de eletricidade, e as suas principais aplicações no meio rural cearense.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados na análise do potencial de aplicação de sistemas híbridos para eletrificação alternativa do meio rural cearense e desenvolvimento do estudo de caso na comunidade rural de Irapuá do município de Pentecoste. A metodologia utilizada consiste basicamente nas seguintes etapas: 1) Pesquisa de campo para identificação, caracterização e análise da curva de potência média diária da comunidade rural de Irapuá do município de Pentecoste, 2) Identificação e análise dos potenciais solar, eólico e biodiesel (B2) da região do município cearense de Pentecoste. Os potenciais solar e eólico foram obtidos através de análise de uma base de dados interpolados de radiação, velocidade e direção do vento, processados através do programa de modelagem numérica RAMS, e visualizados através do programa FERRET. O potencial do biodiesel foi obtido de publicações científicas que referenciam o teor energético, a produção e respectivos custos da utilização das principais oleaginosas predominantes na região do Nordeste do Brasil, 3) Análise da viabilidade financeira de projeto de sistemas híbridos para eletrificação alternativa do meio rural cearense; 4) Especificação, análise, análise, simulação e 5) Seleção dos recursos e componentes do sistema híbrido para eletrificação alternativa e financeiramente viável da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da especificação do sistema híbrido para eletrificação alternativa e financeiramente viável da comunidade rural de Irapuá, do município cearense de Pentecoste, a partir da especificação da respectiva curva de potência média diária.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos e pesquisas futuros, seguido das referências e anexos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO DA ELETRIFICAÇÃO NO BRASIL

A energia elétrica é a mais comum e uma das mais nobres formas de energia secundária⁴. Ela é capaz de proporcionar à sociedade trabalho, renda e desenvolvimento sócio-econômico, tecnológico e ambiental. Sua versatilidade e comodidade a fez priorizada para o suprimento energético. Assim sendo, constituiu-se recurso indispensável e estratégico para a manutenção do desenvolvimento sócio-econômico da sociedade e do Estado (LEÃO, 2008; MARQUES *et al*, 2006).

Ela é atualmente considerada vetor fundamental do desenvolvimento, um direito básico do cidadão, e um dos indicadores do desenvolvimento humano. E pode melhorar a qualidade de vida do homem e do ambiente em que este vive. No meio rural sua importância é ainda maior, pois libera tempo para outras atividades, como educação e lazer. Pode facilitar o acesso a modernos meios de comunicação, aumentar a integração social, combater do êxodo rural e reduzir a exposição da família a gases poluentes (PNUD, 2009).

Além das mudanças de melhoria no modo de vida do homem, com ênfase no meio rural, a eletrificação rural gera impactos sistêmicos sobre a economia, o setor público e o meio ambiente no Brasil, mostrando que seus efeitos vão muito além das fronteiras rurais, através da geração de empregos, arrecadação de impostos e economia de divisas (BARBOSA *et al*, 2004).

O suprimento de energia elétrica é direito do cidadão brasileiro, garantido pela Constituição Federal, que deve ser promovido pelo Estado como parte de sua função social, e fornecido pelas concessionárias locais de energia (MME, 2008).

O sistema elétrico do Brasil é composto na sua maioria de geração hidroelétrica, face seu grande potencial hidráulico, seguido de geração termelétrica, que utilizam combustíveis fósseis, biomassa e nuclear (CREDER, 2006; MARQUES *et al*, 2006).

As concessionárias de energia, empresas do setor elétrico que comercializam o fornecimento da energia elétrica junto aos consumidores, buscam natural e prioritariamente a geração de receitas e a manutenção da rentabilidade financeira de seu empreendimento. Sendo assim, não têm interesse em realizar

⁴ Aquela que resulta das transformações ou da elaboração de recursos energéticos naturais (primários), ou em determinados casos a partir de outra fonte energética já elaborada. Origina-se basicamente de um centro de transformação e, seu possível destino é um centro de consumo e/ou outro centro de transformação.

investimentos sem margem de lucro, o que as leva a preferir projetos de eletrificação nos quais o consumo de energia elétrica seja suficiente para garantir o retorno financeiro do investimento realizado.

Diante deste contexto, o Governo Federal criou programas de incentivo ao uso de energias alternativas e renováveis, estabeleceu metas e criou mecanismos de financiamentos para as concessionárias, com o intuito de garantir a universalização do acesso à energia elétrica (RODRIGUES, 2006).

As fontes alternativas e renováveis de energia representam uma opção para a geração de energia (elétrica e térmica), com a vantagem de produzirem reduzidos impactos ambientais em relação a outras fontes convencionais, e podem substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis (BARBOSA *et al*, 2004).

Em alguns casos de comunidades remotas e/ou isoladas da rede elétrica e com restrições ou indisponibilidade de combustíveis fósseis, as fontes de energias alternativas e renováveis representam a única alternativa de suprimento energético. Como exemplo, há algumas comunidades isoladas do Brasil que podem utilizar resíduos orgânicos agro-pecuários para geração de energia, e algumas comunidades andinas que utilizam energia solar fotovoltaica (GUARDABASSI, 2006).

O Ceará tem normalmente a luz solar durante o dia, mas não se pode contar efetivamente com essa fonte quando o tempo está nublado. Tem também um considerável potencial eólico, sendo alvo de implantação de vários parques eólicos, principalmente na sua faixa litorânea, onde os ventos são mais incensos. Mas, o vento também pode tornar-se inconstante, e ainda eventualmente ocorrer a falta de ambas as fontes. Então, uma terceira opção de fonte energética é necessária para garantir a segurança e qualidade do suprimento de energia elétrica alternativa.

Contudo, é possível aproveitar a complementaridade energética das fontes solar e eólica, e ainda combiná-las à geração a partir de óleo biodiesel B2, dependendo da disponibilidade de recursos. A eletrificação com grupo gerador a partir do biodiesel B2 apresenta-se como solução tecnicamente amadurecida e comercialmente consolidada, renovável e com menor índice de poluição em relação ao óleo Diesel derivado do petróleo. A combinação de duas ou mais fontes de energia caracteriza um sistema híbrido (BARBOSA *et al*, 2005).

A eletricidade é, portanto, indispensável e estrategicamente importante para o desenvolvimento do Brasil. Apesar de dispor de considerável potencial

hidrelétrico, apresenta enorme desequilíbrio social, e enquadra-se na categoria mundial de país em desenvolvimento, principalmente na região do Nordeste Brasileiro (NEB), onde cerca de metade da população rural encontra-se em situação de pobreza e miséria, conforme mostrado na figura 1, elaborado a partir da tabela 24 (PNUD, 2009; ANEEL, 2008).

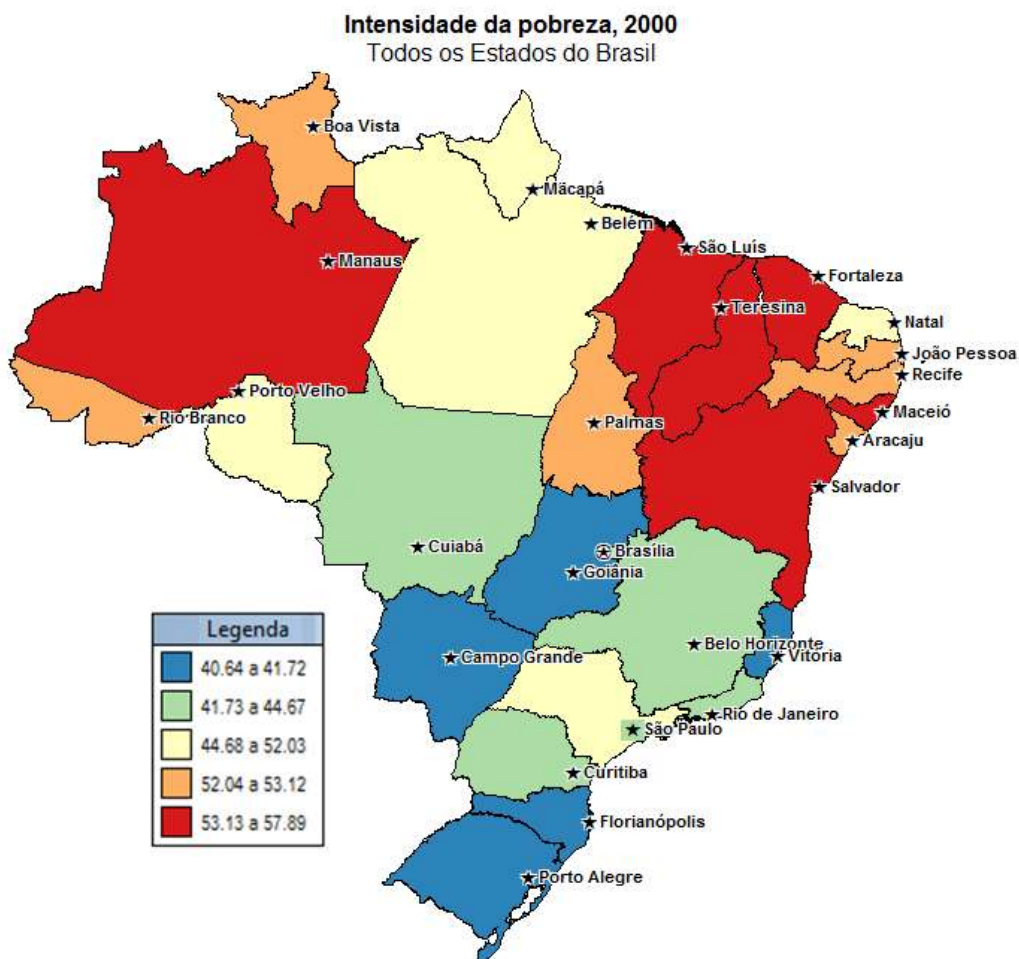


Figura 1 - Intensidade Percentual da Pobreza nos Estados do Brasil
Fonte: PNUD (2009).

A energia elétrica participa cada vez mais de todos os aspectos da cadeia produtiva nacional e o bem-estar sócio-econômico da população depende diretamente de um suprimento suficiente, confiável e de qualidade (ANEEL, 2008).

O Brasil, assim como outros países com crescimento da demanda energética, enfrenta grandes desafios para suprir de eletricidade seu mercado consumidor nas próximas décadas. Dentre os maiores desafios destacam-se: atender a crescente demanda de serviços de eletricidade do país, inclusive na zona

rural e comunidades remotas e/ou isoladas; diversificar a matriz de fornecimento de eletricidade; desenvolver tecnologias de energia com menor impacto ambiental e maior alcance social e que contribuam para o uso racional e eficiente da energia; garantir as características de interesse público em um ambiente de mercado competitivo dos serviços de eletricidade (ANEEL, 2008).

A política de desenvolvimento adotada no Brasil ao longo dos anos, com foco na aceleração do processo de industrialização, estimulou o rápido processo de urbanização e direcionou o setor energético nacional para a produção centralizada de grandes blocos de energia para atendimento adequado aos grandes centros de consumo.

Neste sentido, as áreas de elevado grau de dispersão populacional, baixa densidade demográfica, baixa renda e precária infra-estrutura apresentam elevado grau de não atendimento de eletricidade pelo sistema elétrico interligado (PNUD, 2009).

A partir da tabela 24 do Anexo 1, que relaciona o percentual de brasileiros com renda inferior a 75,50 reais, o percentual de pessoas que vivem em domicílios com energia elétrica e respectivos índices de desenvolvimento humano, é possível perceber que as regiões Norte e Nordeste do Brasil apresentam grande *déficit* no suprimento de energia elétrica em relação às demais regiões, conforme mostrado na figura 2.

O *déficit* de suprimento de eletricidade nas regiões Norte e Nordeste do Brasil contribui para que estes apresentem os menores índices de renda per capita, conforme mostrado na figura 3. Também apresentam os mais baixos índices de desenvolvimento humano (IDH), conforme mostrado na figura 4 (PNUD, 2009).

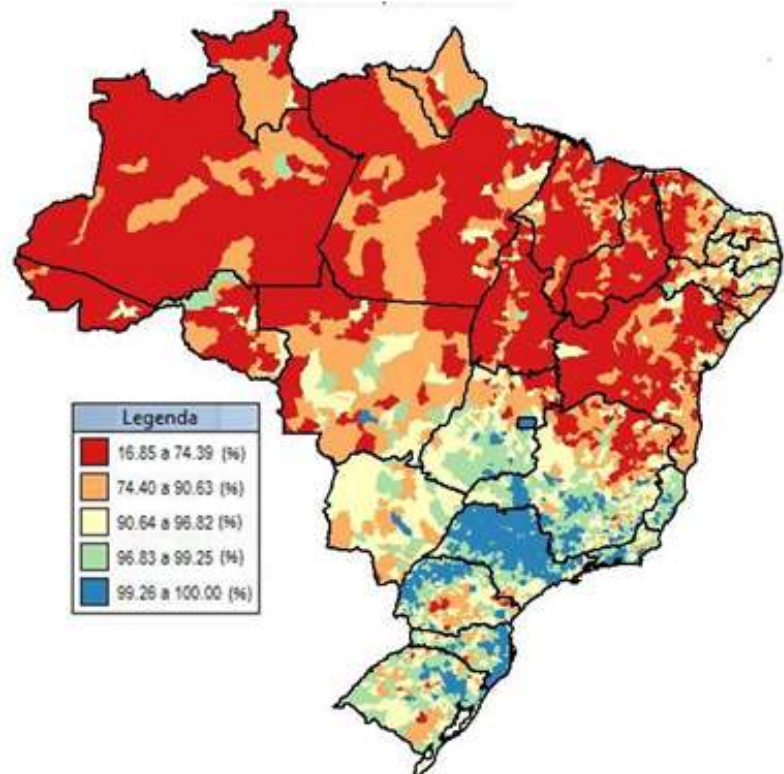


Figura 2 - Percentual de pessoas que vivem no Brasil em domicílios com energia elétrica
Fonte: PNUD (2009).

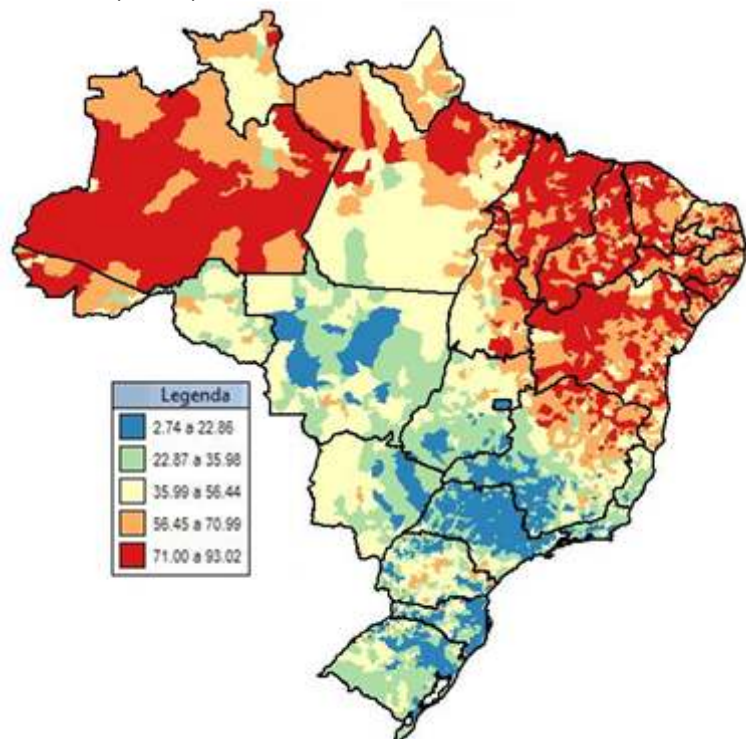


Figura 3 - Percentual de pessoas no Brasil com renda per capita abaixo de R\$ 75,00
Fonte: PNUD (2009).

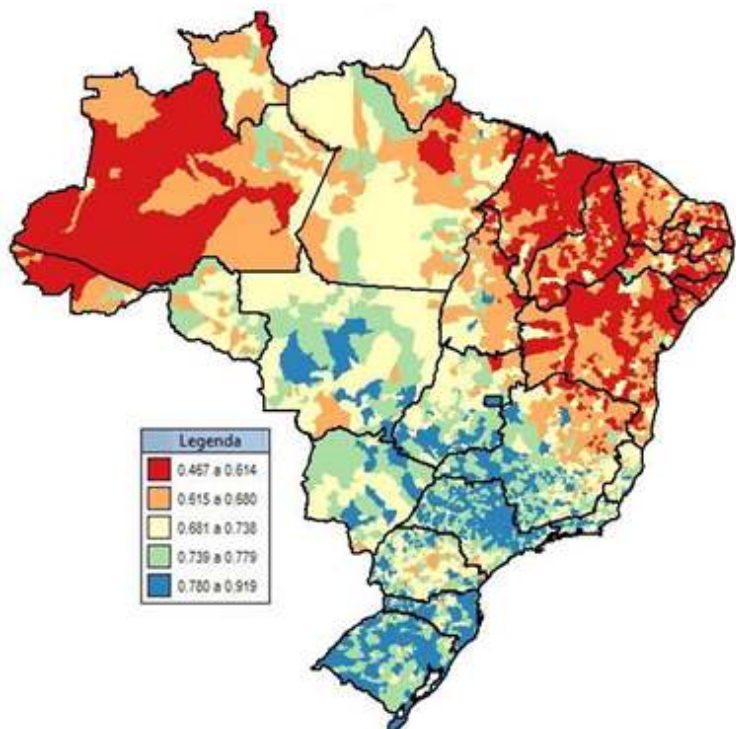


Figura 4 – Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) Brasileiro
Fonte: PNUD (2009).

A análise comparativa dos percentuais de pessoas que vivem no Brasil em domicílios com energia elétrica e dos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) dos 27 Estados Federativos do Brasil mostra que há forte correlação entre ambos, conforme mostrado na figura 5, elaborada a partir da tabela 24 do Anexo 1.

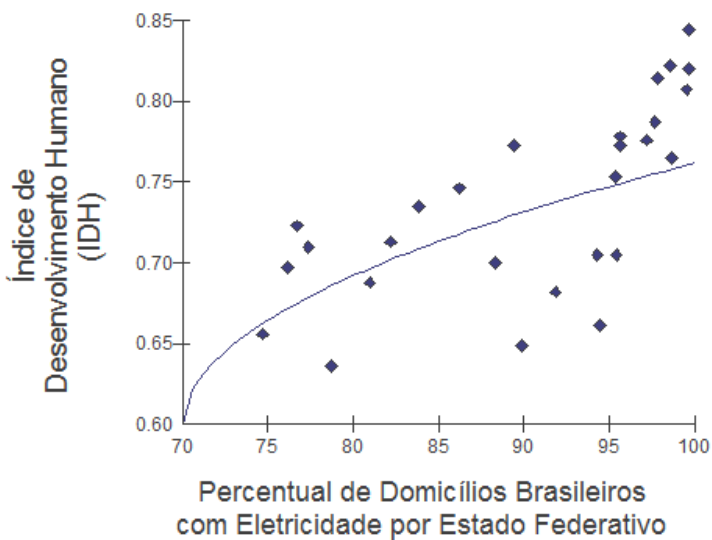


Figura 5 – Correlação entre o IDH e o Percentual de brasileiros que vivem em domicílios com energia elétrica nos Estados do Brasil.

Tais indicadores sócio-econômicos mostram que existe uma forte relação entre o desenvolvimento de um país e seu consumo de energia, conforme mostrado no gráfico. Uma das fontes comprobatórias desta relação é manifestada pelos indicadores históricos do PIB e do consumo de energia. O consumo de energia, neste caso, apresenta-se como mola propulsora para o desenvolvimento setorial, regional e nacional, conforme mostrado na figura 6 (ANEEL, 2008).

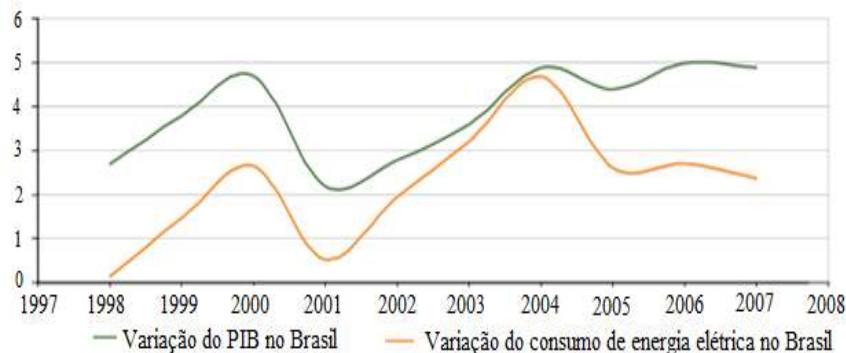


Figura 6 – Correlação entre Variação do PIB e a Variação do Consumo de energia elétrica no Brasil, em US\$/MWh
Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica).

A Lei 10.438/2002 trata da Universalização do Serviço Público de Energia Elétrica, delimitando-a até 2015, evidenciando as significativas contribuições energéticas e reduzidos impactos ambientais das fontes de energias renováveis (MME, 2009).

A tabela 1 apresenta uma análise comparativa das tarifas médias por classe de consumo de energia elétrica no Brasil entre os anos de 2008 e 2009, em US\$/MWh. Ela mostra que o consumo total de energia elétrica no Brasil no ano de 2008 foi de 383,641 TWh, e no ano de 2009 foi de 388,161 TWh, o que representa um crescimento de 101% (MME, 2010).

A demanda de energia elétrica tende naturalmente a crescer com o aumento populacional. A sociedade anseia melhor qualidade de vida, educação, lazer, emprego e renda, o que impulsiona a produção de bens e serviços, e avanços tecnológicos, conforme representados nas figuras 7 e 8, e na tabela 1.

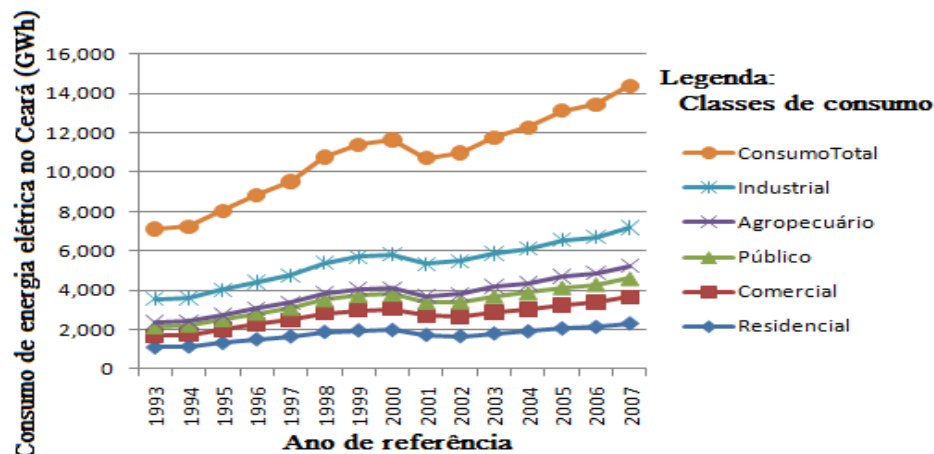


Figura 7- Evolução do consumo de energia elétrica (GWh) no Ceará de 1993 e 2007
Fonte: Balanço Energético do Ceará, ano base 2007 (SEINFRA, 2010)

Tabela 1 – Estatística do Consumo de Energia Elétrica no Brasil nos anos de 2008 e 2009

	NORTE		NORDESTE		SUDESTE		SUL		CENTRO-OESTE		BRASIL	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
(GWh/ano)	23.124	23.821	63.782	64.281	208.916	209.394	65.536	66.275	22.282	24.100	383.641	388.151
Residencial	4.745	5.083	15.174	16.239	49.668	52.601	15.009	15.725	6.832	7.363	91.427	97.010
Industrial	12.553	12.601	29.439	28.095	100.527	95.708	29.451	28.745	5.780	6.147	177.751	171.297
Comercial	2.835	3.031	8.564	9.077	33.684	35.713	10.053	10.782	4.469	4.980	59.605	63.583
Outros	2.991	3.106	10.605	10.870	25.037	25.372	11.023	11.023	5.201	5.610	54.858	56.261

Fonte: Adaptado de MME (2010).

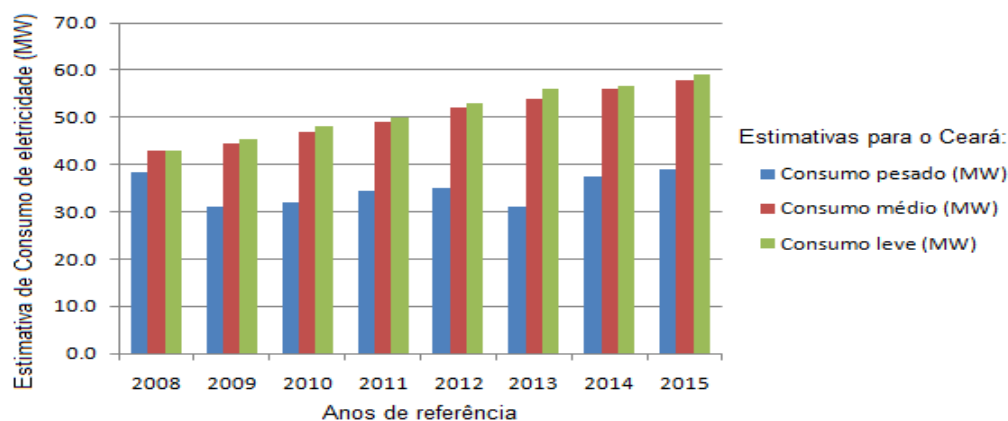


Figura 8 - Estimativa da evolução do consumo de eletricidade do Estado do Ceará,
Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015 (MME, 2010)

Para atendimento da demanda crescente de energia elétrica estima-se para o ano de 2030 uma produção total de 1.197,6 TWh de energia elétrica, e um consumo total de 1.032,7 TWh, o que significa uma expansão média de 4% ao ano a partir de 2005 (PNE 2030, 2007).

Em se tratando do fator custo benefício no atendimento elétrico, esta analogia é devidamente compreendida, pois quando há uma região com uma determinada densidade populacional ou com um poder de consumo elétrico maior, o custo de retorno financeiro para a extensão de uma linha da rede elétrica convencional é mais atrativa para a concessionária. Mesmo nos casos em que a atratividade não é inicialmente percebida, o fator de inadimplência pode ser minimizado nestes casos (CARVALHO e COELHO JUNIOR, 2007).

Infelizmente a região Nordeste do Brasil, além de apresentar índice de IDH inferior em relação a regiões mais desenvolvidas do Brasil, ainda é penalizada com tarifas de energia elétrica superiores às tarifas daquelas. Isto ocorre em praticamente todas as suas classes de consumo, com ênfase na classe rural cuja tarifa de energia elétrica aplicada no ano de 2008 foi 35,63% superior à tarifa rural da região Sul, exceto com a classe residencial, conforme mostrado na tabela 2 (MME, 2010).

Tabela 2 - Tarifas médias de consumo de eletricidade por classe de consumo e regiões do Brasil em 2008 (US\$/MWh).

Tarifa (US\$/MWh)	NORTE	NORDESTE	SUDESTE	SUL	CENTRO-OESTE	BRASIL
Tarifa média	132,90	122,95	138,59	122,95	132,79	131,88
Residencial	153,68	131,18	155,18	148,53	153,20	153,49
Industrial	103,29	121,52	121,10	113,52	109,80	108,55
Comercial	138,70	163,20	147,79	136,52	148,17	147,60
Rural	117,22	111,12	104,19	81,93	108,16	97,38
Outros	338,43	387,61	356,49	306,39	345,72	331,92

Fonte: Adaptado do Informativo Tarifário de Energia Elétrica (MME, 2010).

A eletricidade é, portanto, indispensável e estrategicamente importante para o desenvolvimento do Brasil, que dispõe de considerável potencial hidrelétrico. Mas, apresenta enorme desequilíbrio social, apesar de enquadrar-se na categoria

mundial de país em desenvolvimento, principalmente na região do Nordeste Brasileiro (NEB), onde cerca de metade da população rural encontra-se em situação de pobreza e miséria, conforme mostrado na figura 1 (PNUD, 2009; ANEEL, 2008).

Os sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas e renováveis de energia apresentam uma contribuição energética cada vez mais significativa no dia-a-dia da sociedade atual.

Neste sentido, é interessante aprofundar o conhecimento sobre sistemas híbridos e as respectivas aplicações na geração de eletricidade a partir de fontes alternativas e renováveis de energia. Pois estes podem, conforme disponibilidade de potencial e viabilidade financeira, social e ambiental, contribuir para reduzir das desigualdades sócio-econômicas regionais e para melhorar a qualidade de vida da sociedade local, principalmente de áreas rurais remotas e/ou isoladas da rede elétrica, possivelmente com um mínimo de impacto ambiental (BARBOSA *et al*, 2005; GARCÍA, 2004).

Tais evidências justificam investimentos em pesquisas e projetos de sistemas híbridos para geração de energia elétrica a partir de fontes alternativa e renováveis de energia, priorizando as viabilidades social, financeira, ambiental e técnica (PNE 2030, 2007).

2.1 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Um sistema elétrico é basicamente formado por equipamentos e materiais instalados para gerar, transportar e distribuir a energia elétrica até os pontos de sua utilização. Desenvolve-se em quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e utilização, conforme mostrado na figura 9 (ANEEL, 2008; CREDER, 2006).

A geração é a etapa desenvolvida nas usinas para produção de energia elétrica por transformação, a partir de fontes primárias, em voltagens de geralmente de 13,8kV, mas pode situar-se na faixa de 10 a 30 kV. As usinas podem ser classificadas em hidrelétricas, termoelétricas e nucleares, dentre outras.

A transmissão consiste no transporte da energia elétrica, em elevadas voltagens, de 69 a 500 kV, das usinas até os centros consumidores. Grandes consumidores são alimentados pelas concessionárias de energia elétrica a partir das

linhas de transmissão. E nestes casos, as etapas posteriores de abaixamento do nível de voltagem ficam a cargo do próprio consumidor.

A distribuição é geralmente desenvolvida pelas concessionárias nos centros consumidores, podendo ser primária ou secundária. A distribuição primária atende diretamente indústrias e prédios (comerciais, institucionais e residenciais) de grande porte (geralmente com nível de voltagem de 13,8 kV), que possuem subestação ou transformador próprio. A distribuição primária também alimenta a distribuição secundária, que apresenta um nível de tensão reduzida (120 V / 220 V / 380 V), para atendimento a pequenos consumidores: residências, salas comerciais, pequenos prédios, oficinas, pequenas indústrias, dentre outros (ANEEL, 2008; CREDER, 2006).

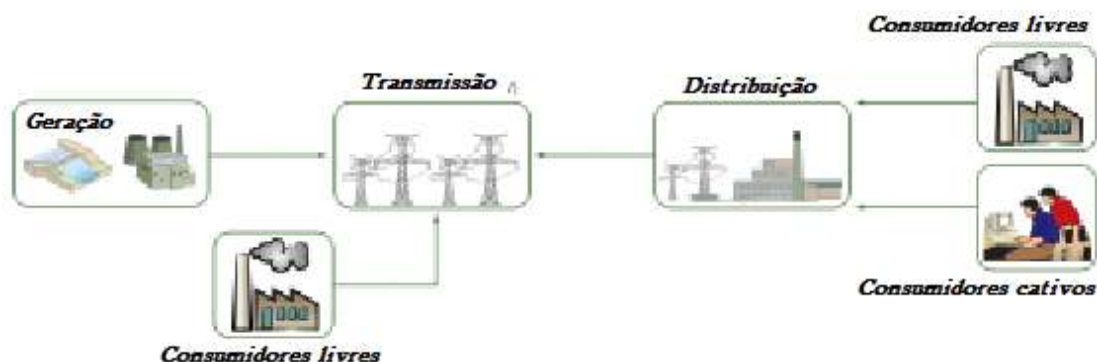


Figura 9 - Representação simplificada de um Sistema Elétrico: geração, transmissão, distribuição e utilização.

Fonte: Adaptado do Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008).

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado pela produção de energia elétrica em larga escala de forma centralizada em grandes usinas de eletricidade, com ênfase nas grandes centrais hidrelétricas, que abastecem o Sistema Interligado Nacional (SIN). A maioria das grandes centrais hidrelétricas concentra-se em regiões subdesenvolvidas, distantes dos grandes centros consumidores e com fortes restrições ambientais. Tais fatores elevam os custos de produção, transmissão e distribuição da energia gerada, em função das grandes extensões de rede (ANEEL, 2009; LEÃO, R. P, 2008).

A tradicional vulnerabilidade das condições climáticas da região Nordeste do Brasil (NEB) o torna naturalmente dependente da fonte hídrica, o que resulta em maior dificuldade de atração de novos investimentos para essa região. Isto pode ser compensado com a utilização de fontes de energia alternativas e renováveis para

suprimento de energia elétrica, contribuindo para reduzir o consumo da água represada nos reservatórios das usinas hidrelétricas. E assim, liberando a água para consumo humano e agro-pecuário (MENEZES NETO, 2007).

Neste cenário, o Governo Federal formaliza algumas políticas públicas em programas para promover o desenvolvimento sócio-econômico, melhorar e desenvolver o setor elétrico e viabilizar e efetivar a universalização do uso da energia no Brasil.

2.2 PRINCIPAIS PROGRAMAS PARA UNIVERSALIZAÇÃO ELETRICIDADE NO BRASIL

Um dos maiores desafios do Governo Federal consiste em prover energia elétrica, com qualidade e confiabilidade a toda população brasileira, principalmente do meio rural, que apresentam os menores índices de desenvolvimento humano (IDH), com predominância de famílias de baixa renda⁵ e de exclusão do uso da eletricidade no Brasil, conforme mostrado nas figuras 2, 3 e 4, e tabela 24.

A sociedade vem exigindo cada vez mais programas sócio-econômicos capazes de proporcionar soluções viáveis, tanto no contexto técnico quanto econômico, de modo a melhorar o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (CARVALHO e COELHO JUNIOR, 2007).

A análise comparativa das figuras 5 e 6 mostra que o fornecimento de energia elétrica é um dos fatores estratégicos que estimula simultaneamente a melhoria dos níveis de IDH do Brasil. Neste sentido, vários programas governamentais foram lançados para melhorar os índices de suprimento de energia elétrica.

2.2.1 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL):

O PROCEL foi instituído em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, e é gerido por uma Secretaria Executiva subordinada à ELETROBRAS. Seu objetivo consiste em promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, e, conseqüentemente, eliminar desperdícios e reduzir custos do setor elétrico. Foi transformado em Programa de

⁵ Programa do Governo Federal Brasileiro TARIFA SOCIAL BAIXA RENDA (TSBR)

Governo em 18/07/1991, tendo suas abrangência e responsabilidades ampliadas (ELETROBRAS, 2009).

2.2.2 Programa Nacional de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM):

O PRODEEM é um programa do Governo Federal instituído por Decreto Presidencial em 27/12/1994, sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia - MME por intermédio do Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético - DNDE. É integrante do Programa Avança Brasil, PPA 2000-2003, Programa 0273: Energia das Pequenas Comunidades, e teve sua denominação alterada para Energias das Pequenas Comunidades (MME, 2009).

O objetivo do PRODEEM é basicamente atender comunidades carentes isoladas, não supridas de energia elétrica pela rede convencional, utilizando fontes renováveis locais em base auto-sustentável. A sua atuação é direcionada para a eletrificação de escolas, postos de saúde, centros comunitários, bombeamento comunitário d'água, dentre outros (MME, 2009).

Através do PRODEEM, entre os anos de 1995 e 2002, foram adquiridos cerca de 8.900 sistemas para atender ao abastecimento de água potável, energia elétrica e iluminação pública a comunidades ainda não supridas de energia elétrica (CARVALHO e COELHO JUNIOR, 2007, RODRIGUES, 2006).

O PRODEEM desenvolve no Ceará várias parcerias para utilização de energia solar, recurso abundante no Ceará, visando integrar e resgatar a dívida social com as comunidades carentes e distantes da rede de energia elétrica convencional, apesar já ter alcançado beneficiar mais de 80% de domicílios rurais cearenses. Com o apoio do Ministério das Minas e Energias (MME), o PRODEEM e outros parceiros implantaram de 1998 a 2002 vários sistemas no Ceará (SEINFRA, 2008):

- Parceria MME (PRODEEM) / CHESF / SEINFRA / SOHIDRA (Sistema de Bombeamento): 204 sistemas instalados.
- Parceria MME (PRODEEM) / CHESF/SEINFRA/CENTEC (Sist. Escolares): 21 sistemas instalados.

- Parceria SEINFRA / BP Solar (2 comunidades): 170 Sistemas Residenciais, 2 Sistemas energéticos escolares, 2 sistemas de Bombeamento.
- Projeto Alvorada - MME / SEINFRA (BP Solar – executora): 257 sistemas Energéticos Escolares.

O Governo do Estado do Ceará, através da SEINFRA, em parceria com o Ministério das Minas e Energia (MME), o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis – IDER, o Centro para Democratização da Informática (CDI) e a agência norte-americana USAID, *United States Agency for International Development* (USAID), implantou na comunidade de Bom Jesus no município cearense de Itapipoca, no ano de 2007, um projeto com uma ilha digital e um sistema de bombeamento d'água para irrigação e produção de agricultura orgânica, ambos energizados com sistemas solar fotovoltaicos. O total instalado foi de 658 sistemas, dos quais 207 de bombeamento d'água, 280 escolares e 170 residenciais, conforme mostrado na tabela 3 (SEINFRA, 2008).

Tabela 3 - Resumo de Sistemas Fotovoltaicos instalados no Ceará através do PRODEEM de Dez/1999 a Nov/2004

Sistema	Parceiros	Unidades instaladas	Potência instalada (W)	Investimento (R\$)
Bombeamento	MME / CHESF / SEINFRA / SOHIDRA	204	306.000	367.200
Bombeamento	SEINFRA / BP Solar	2	3.000	1.149
Escolares	MME / CHESF / SEINFRA / CENTEC	21	2.226	49.350
Escolares	Projeto Alvorada – MME / SEINFRA	257	27.242	719.600
Escolares	SEINFRA / BP Solar	2	212	1.149
Residencial	SEINFRA / BP Solar	170	18.020	97.701
Agricultura Orgânica	MME/SEINFRA/USAID/IDER	1	1.500	1.800
Ilha Digital	MME/SEINFRA/USAID/CDI/IDER	1	106	2.800
Resumo Instalado				
Bombeamento		206	309.000	368.349
Escolares		280	29.680	770.099
Residencial		170	171	172
TOTAL		656	338.851	1.138.621

Fonte: SEINFRA-CE (2008).

2.2.3 Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA):

O PROINFA foi instituído em 26 de abril de 2002, pela Lei nº 10.438, foi revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, com objetivo basicamente de promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais. Mas, iniciou, de fato, a partir de regulamentação através do decreto nº 5.025 de 2004 (MME, 2009).

Previa a implantação de 144 usinas, totalizando 3.299,40 MW de capacidade instalada, sendo 1.191,24 MW provenientes de 63 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), 1.422,92 MW de 54 usinas eólicas, e 685,24 MW de 27 usinas a base de biomassa, com a garantia de contratação por 20 anos pela ELETROBRÁS. A Lei 11.943 de 28/05/2009 determina que o prazo de início de funcionamento desses empreendimentos encerra em 30 de dezembro de 2010 (MME, 2009).

2.2.4 Tarifa Social Baixa Renda (TSBR):

A Tarifa Social Baixa Renda é um benefício criado pelo Governo Federal para conceder descontos, junto a Concessionária de energia elétrica local, na tarifa de energia elétrica das famílias de baixa renda. Ela foi criada pela Lei nº 10.438, de 26/04/2002 e regulamentada pelas Resoluções nº 246, de 30/04/2002 e nº485, de 29/08/2002.

As unidades consumidoras podem ser beneficiadas pela TSBR desde que atendam a pelo menos uma das seguintes condições:

- Residencial monofásica com média mensal de consumo (calculado com base nos últimos 12 meses) até 80 kWh e que não apresente nesse período mais de um consumo superior a 120 kWh. Para estes casos o cadastramento é feito automaticamente pela Concessionária.
- Residencial monofásica com média mensal de consumo entre 80 e 220 kWh (calculado com base na média dos últimos 12 meses), inscrito no

"Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal" ou beneficiário dos Programas "Bolsa Escola Federal" ou "Bolsa Alimentação Federal" que seja cadastrada junto à Concessionária.

2.2.5 Programa "Luz Para Todos" (PLPT)

O PLPT foi instituído em novembro de 2003 com o desafio de acabar com a exclusão elétrica no país, e teve por meta inicial levar energia elétrica para mais de 10 milhões de pessoas do meio rural até o ano de 2008. É coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), operacionalizado pela ELETROBRÁS e executado pelas concessionárias de energia elétrica e cooperativas de eletrificação rural (MME, 2009)

Dentre seus principais objetivos destacam-se:

- Contribuir para integração das iniciativas do Governo Federal no meio rural;
- Agregar valor a cada um dos programas sociais do Governo Federal através do acesso à energia elétrica (escolas, postos de saúde, centros comunitários, e afins);
- Propiciar o envolvimento das famílias e comunidades;
- Capacitar executores e beneficiários, e estimular o desenvolvimento da demanda.

O PLPT contempla o atendimento das demandas no meio rural através da utilização de uma das três alternativas tecnológicas (MME, 2009):

- Extensão de Rede elétrica;
- Sistemas de Geração Descentralizada⁶ com Redes Isoladas;
- Sistemas de Geração Individuais (unidades isoladas).

Para o atendimento com a tecnologia de extensão de redes de distribuição, vários critérios estabelecidos no MANUAL DE OPERACIONALIZAÇÃO⁷ do PLPT, e os custos de equipamentos, materiais e serviços a serem observados

⁶ Denominação do conjunto de unidades geradoras de um sistema elétrico isolado que atende a uma comunidade (MME, 2009).

⁷ <http://luzparatodos.mme.gov.br>

para fins de análise técnica e orçamentária devem estar compatíveis com os custos de referência da ELETROBRÁS. Os Agentes Executores deverão priorizar tecnologia, materiais e equipamentos de rede que resultem em redução do custo das redes (MME, 2009).

Conforme o MME (2009), os critérios básicos a serem atendidos para eletrificação via extensão de rede do Programa Luz Para Todos são:

- Rede trifásica primária, incluindo adição de fases, em extensão não superior a trinta por cento do comprimento total da rede primária;
- Redes primárias bifásicas com neutro e trifásicas, incluindo adição de fases, com extensão não superior a quarenta por cento do comprimento total da rede primária;
- Sistemas elétricos monofásicos multiterrados (F-N), bifásico sem neutro ou monofilares com retorno por terra - MRT, em extensão não inferior a sessenta por cento do comprimento total da rede primária;
- As obras de reforço (subestações, ampliação de pequenas centrais geradoras em sistemas isolados, re-isolamento, compensação reativa, re-ligamento e regulação de tensão), deverão representar, no máximo, dez por cento do valor total do programa de obras, excluindo-se o valor total referente às fontes alternativas e geração fóssil;
- A potência instalada de transformação, por unidade consumidora, não poderá ultrapassar 15 kVA, exceto em casos especiais, como poços d'água para atendimento comunitário, centros comunitários de produção, escolas e postos de saúde, quando a carga assim o justificar;
- A utilização de sistemas de distribuição rural (redes e subestações), em tensões até 34,5kV;
- Programas prevendo subestações deverão apresentar projetos contendo diagrama unifilar completo, acompanhado de estudo de carga detalhado que comprove a necessidade de construção, ampliação ou reforço, bem como o número de novos consumidores a serem atendidos pelo Programa LPT; exceto quando se tratar de subestação de sistemas de geração descentralizada, sobre a qual a ELETROBRÁS analisará a necessidade do detalhamento;

- Em todas as residências com ligações monofásicas ou em residências em assentamentos rurais, comunidades remanescentes de quilombos ou territórios indígenas com ligações bifásicas, o Agente Executor deverá providenciar um kit de instalação interna que consiste no fornecimento e instalação de um ponto de luz por cômodo até o limite de três pontos de luz, duas tomadas, condutores, lâmpadas e demais materiais necessários. O custo referente à instalação do kit poderá constar do orçamento do Programa de Obras a ser apresentado à ELETROBRÁS. O Agente Executor deverá apresentar a relação do(s) beneficiado(s) com esta instalação;
- Para atendimento de estabelecimentos coletivos, tais como escolas, postos de saúde e centros comunitários de produção, incluir o kit de instalação interna completo, contendo lâmpadas fluorescentes e tomadas. O custo referente a essa instalação poderá constar do orçamento do Programa de Obras a ser apresentado à ELETROBRÁS, na planilha referente ao módulo “kit de instalação interna”;
- A instalação interna é de total responsabilidade do Agente Executor, devendo ser executada de forma a não oferecer risco de contato acidental com partes energizadas.

Para o atendimento com sistemas de geração descentralizada com redes isoladas (mini-redes), o custo do projeto (geração e redes, operação e manutenção, combustível, etc), por consumidor, será comparado com o valor de projeto de extensão de rede convencional e com o custo do sistema individual equivalentes para fins de aprovação. Segundo o MME (2009), as suas principais opções tecnológicas são:

- Micro e mini-centrais hidrelétricas;
- Pequenas centrais hidrelétricas;
- Pequenas centrais térmicas a partir de óleo Diesel;
- Pequenas centrais térmicas de biomassa sólida;

- Pequenas centrais com motor de combustão interna para óleos vegetais “in natura” (produzidos na região), biodiesel (produzido na região) ou biogás (metano proveniente de um biodigestor);
- Centrais fotovoltaicas;
- Aero geradores;
- Sistemas híbridos com duas ou mais das tecnologias citadas anteriormente.

Dentre as opções tecnológicas consideradas pelo MME (2009) para atendimento através de sistemas de geração individuais apresentam-se:

- Hidroeletricidade;
- Solar fotovoltaica;
- Energia eólica;
- Biomassa;
- Sistemas híbridos, resultantes da combinação de duas ou mais fontes acima citadas.

Tais projetos deverão ser justificados comparativamente com as outras possibilidades para sua aprovação e deverão obedecer à regulamentação específica e normativa da ANEEL (MME, 2009).

Contudo, para o atendimento com sistemas de geração descentralizada e individuais, os projetos deverão observar as condições ambientais, a atividade de capacitação dos usuários e sua sustentabilidade (MME, 2009).

O PLPT desenvolveu-se basicamente pela extensão de rede, face esta alternativa apresentar amadurecimento tecnológico. Em maio de 2009 atingiu a meta de levar energia elétrica gratuitamente a cerca de 2 milhões de famílias em todo o Brasil (MME, 2010).

2.3 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE ELETRIFICAÇÃO DO NO MEIO RURAL

Conforme contemplado no PLPT, existem várias opções tecnológicas que podem ser utilizadas para a eletrificação do meio rural. Tais opções podem ser

sintetizadas em extensão de rede, geração descentralizada com redes isoladas a partir de fontes renováveis de energia, e unidades isoladas de geração de eletricidade abastecidas por geradores a óleo Diesel, recursos renováveis e/ou combinação destes.

Tais tecnologias podem didaticamente ser divididas em convencionais e alternativas. Dentre as convencionais situam-se a eletrificação através de extensão de rede e de gerador a óleo Diesel, ambas bastante amadurecidas e consolidadas. E dentre as alternativas apresentam-se os sistema solar fotovoltaicos, a geração eólica, as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e os geradores abastecidos por biomassa e/ou óleos vegetais.

O objetivo deste capítulo é basicamente especificar as vantagens e desvantagens das tecnologias apresentadas.

2.3.1 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE EXTENSÃO DE REDE ELÉTRICA

A tecnologia de extensão da rede elétrica apresenta algumas vantagens e limitações. Apresenta-se bastante amadurecida e consolidada no cenário energético, mas não é totalmente disponibilizada através do sistema convencional de redes de distribuição, principalmente para o meio rural integralmente, sob aspectos de viabilidade técnica, financeiros, sociais e ambientais.

A dispersão populacional, as longas distâncias entre os pontos de origem da rede elétrica de distribuição e de consumo, o elevado custo de investimento, o baixo número de consumidores por quilômetro, a baixa potência instalada por quilômetro, o elevado custo do quilômetro de rede elétrica, a baixa taxa de crescimento de demanda de eletricidade, a baixa taxa de retorno do investimento, somadas desmotivavam as concessionárias de energia elétrica a realizarem investimento de extensão de rede para eletrificação rural (RODRIGUES, 2006).

Para efeito de contextualização dos índices técnico-financeiros médios dos planos de obras de extensão de rede durante o ano de 2004, após análises técnica e orçamentária, foram emitidos pareceres referentes a 28 planos de obras de agentes executores paulistas, dos quais 13 foram enviados por concessionárias e 15 por cooperativas de eletrificação rural, totalizando 42.646 ligações elétricas planejadas para serem atendidas através do Programa Luz para Todos.

Em média foram observados uma média de 7,2 consumidores por quilômetro de rede elétrica, uma potência média de 4,5 kVA por consumidor, uma média de 2,6 consumidores por transformador, uma potência média de 12 kVA por transformador, uma média de 2,7 transformadores por quilômetro de rede elétrica, uma média de 13,8 postes por quilômetro de rede elétrica, um custo médio contratado da ligação por consumidor de R\$ 3.400,22, e um custo médio contratado do quilômetro de extensão rede por consumidor de R\$ 24.472,00 (BETIOL JUNIOR, 2006).

A tabela 4 mostra que no sistema de extensão de rede os custos crescem com o prolongamento da rede elétrica de distribuição e diminuem com o aumento do número de residências atendidas pela mesma. Assim, a relação custo-benefício desfavorável provoca baixa atratividade da eletrificação rural por meio da extensão da rede para as concessionárias, tornando-a um serviço de baixo retorno para as concessionárias (RODRIGUES, 2006).

Tabela 4 - Custo da Extensão de Rede Elétrica no Meio Rural em Função do Número de Residências e do Prolongamento da Rede Elétrica.

Número de residências	(R\$ / 0,5 Km) / Num. de residências	(R\$ / 1 Km) / Num. de residências	(R\$ / 2 Km) / Num. de residências	(R\$ / 5 Km) / Num. de residências	(R\$ / 8 Km) / Num. de residências	(R\$ / 9 Km) / Num. de residências	(R\$ / 10 Km) / Num. de residências
1	2.964,89	4.644,69	7.971,42	17.951,59	27.931,76	31.258,48	34.85,21
5	1.619,71	2.45,62	4.644,69	9.634,78	14.624,87	16.288,23	17.951,59
10	647,92	815,91	1.148,58	2.459,62	3.770,66	4.207,68	4.644,69
15	593,02	705,01	926,80	1.731,26	2.605,29	2.896,63	3.187,98
20	565,58	649,57	815,91	1.367,08	2.022,60	2.241,11	2.459,62
30	538,12	594,12	705,01	1.037,69	1.439,91	1.585,59	1.731,26
50	516,16	549,76	616,30	815,91	1.617,19	1.082,04	1.148,58

Fonte: Adaptado de Costa e Da Costa (2000).

As principais vantagens da extensão de rede são o amadurecimento e consolidação, a flexibilidade de expansão diante do crescimento da demanda energética. Dentre as principais limitações da extensão de rede elétrica encontra-se o elevado custo de implantação desta tecnologia em regiões remotas, isoladas e de baixa demanda de eletricidade, conforme mostradas na tabela 5.

Tabela 5 - Principais vantagens e limitações da extensão da rede elétrica de distribuição.

Principais vantagens	Principais limitações
Tecnologia amadurecida e consolidada tecnicamente;	Elevado custo de implantação em regiões distantes ou isoladas, e/ou de baixa demanda;
Flexibilidade de expansão face aumento da demanda;	Logística de cobrança e dificuldade de medição;
Reduzidos problemas de operação e manutenção;	Super-dimensionamento do cabo condutor para atender demandas futuras;
Independência em relação a combustíveis;	Consideráveis custos de investimento;
Boa resposta às variações diárias e sazonais;	Alterações políticas podem contribuir nas dificuldades financeiras das concessionárias;
Facilidade quanto à segurança sobressalente.	Restrições legal-ambientais podem ser limitantes.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2006).

2.3.2 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERADOR A DIESEL E/OU BIODIESEL B2

Diante da consolidação do mercado, os grupos geradores a partir de combustíveis fósseis predominam na aplicação de geração de eletricidade em sistemas descentralizados. Isto decorre principalmente dos respectivos possuírem relativo baixo custo de capital inicial, e capacidade de geração de eletricidade em conforme demanda.

Contudo, esta aparente vantagem de apresentar uma solução relativamente simples, de baixo investimento inicial, acarreta elevados custos de operação e manutenção ao longo da vida útil do sistema a Diesel e/ou biodiesel, além consideráveis emissões de gases de efeito estufa.

Diante do não suprimento de eletricidade por parte das concessionárias locais, tradicionalmente, a grande maioria de comunidades rurais remotas e eletricamente isoladas da rede elétrica recorrem a geração de eletricidade a partir do óleo Diesel e/ou do biodiesel B2 (BORGES NETO, 2007).

A tecnologia de geração de eletricidade a partir do óleo Diesel é caracterizada basicamente pela combustão direta de combustíveis fósseis. Há várias tecnologias em uso, ou em desenvolvimento, que permitem o uso variado de combustíveis renováveis, a exemplo do biodiesel B2. Apresenta algumas restrições ambientais, com ênfase na emissão de gases de efeito estufa.

Dentre as principais limitações destacam-se a emissão de gases poluentes e de efeito estufa, a vulnerabilidade quanto a fatores logísticos e externos,

e os elevados custos de abastecimento de óleo combustível. Tais limitações podem ser parcialmente superadas através da substituição do óleo Diesel pelo biodiesel B2, que pode ter produção local ou regional (RODRIGUES, 2006).

O biodiesel é o combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamentação, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. A nomenclatura adotada mundialmente para caracterizar a proporção de biodiesel na misturada com o Diesel é basicamente “BX”, onde “B” representa o Biodiesel e o “X” representa a percentagem em volume de Biodiesel acrescentado à mistura combustível com o Diesel (PNPB, 2009).

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, PNPB, define que a partir de janeiro de 2008 será obrigatória, pela Lei nº 11.097/2005, em todo território nacional, a mistura B2, ou seja, 2% de biodiesel e 98% de Diesel de petróleo. E que janeiro de 2013, essa obrigatoriedade passará para 5% (B5). Há possibilidade também de empregar percentuais de mistura mais elevados e até mesmo o biodiesel puro (B100) mediante autorização da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (PNPB, 2009).

O uso do biodiesel pode apresentar vantagens competitivas em relação aos demais combustíveis. Pode substituir o Diesel, o que possibilita viabilizar a obtenção de divisas no mercado internacional de créditos de carbono⁸, contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promover o desenvolvimento sócio-econômico local e benefícios ambientais (PNPB, 2009; MENESES, 2005).

O Brasil apresente condições de solo e clima favoráveis à produção de biomassa, conseqüentemente de biodiesel (PNPB, 2009).

O Governo do Estado do Ceará lançou em 2007 o Programa Biodiesel do Ceará (PBDCE), com o objetivo de promover a agricultura do Ceará através da diversificação da produção rural, promoveu, através do Banco do Brasil, com recursos financeiros assegurados pelo Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), a distribuição gratuita de sementes selecionadas de

⁸ Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificados emitidos quando ocorre a redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE). Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivalente corresponde a um crédito de carbono. Este crédito pode ser negociado no mercado internacional. A redução da emissão de outros gases que também contribuem para o efeito estufa também pode ser convertidos em créditos de carbono, utilizando o conceito de Carbono Equivalente.

mamona e girassol, dentre outras oleaginosas, e o pagamento de subsídio por cada novo hectare plantado (UECE, 2010).

Através do Programa de Distribuição de Sementes do Governo do Estado do Ceará, os produtores têm a garantia da compra da produção pela Petrobras e Brasil *Ecodiesel*, por um preço mínimo de R\$ 0,70 para a mamona e R\$ 0,50 para o girassol. Eles são ainda beneficiados com R\$ 150 por cada novo hectare plantado, dividido em duas parcelas, limitado ao máximo de três hectares por família, e têm subsídio de 50% para comprar calcário, a fim de corrigir a acidez do solo. Há previsão de ampliação dos benefícios com o aumento do pagamento do subsídio para R\$ 200 por cada novo hectare plantado de mamona, e o preço mínimo de R\$ 1,00 por quilo da oleaginosa (PBDCE, 2010).

O óleo de mamona é o glicerídeo naturalmente solúvel em metanol e etanol, e viscosidade elevada, e com maior conteúdo de oxigênio do que os demais óleos. Tais características o tornam um dos melhores insumos para produção do biodiesel (MENESES, 2005).

Segundo HINRICHS e KLEINBACH (2003), as principais vantagens do biodiesel são:

- elevada competitividade em relação a outras alternativas convencionais de geração energética para redução da poluição;
- pode complementar a demais tecnologias alternativas e renováveis na geração de energia; apresenta uma redução nos índices de emissão de gases tóxicos em relação ao Diesel;
- apresenta um rendimento combustível igual ou superior ao óleo Diesel;
- pode utilizar a estrutura de distribuição e venda existente para o Diesel;
- não requer conversão adicional ao motor a Diesel;
- não altera o tempo de reabastecimento e/ou manutenção;
- não altera o consumo nem o torque do motor;
- melhora a lubrificação do motor e da bomba injetora;
- melhora as condições de funcionamento em tempo frio;
- melhora as condições anti-explosão e evita incêndio;
- apresenta estabilidade na mistura;
- pode ser armazenado em tanques similares aos de óleo Diesel;
- não forma misturas explosivas no ar.

Infelizmente, os custos de produção do biodiesel ainda continuam maiores que do Diesel⁹. Para torná-lo economicamente mais atraente deve haver intensificação de incentivos fiscais, subsídios, valorização de co-produtos resultantes do processo produtivo (BORGES NETO, 2007).

O biodiesel apresenta os seguintes impactos sociais, econômicos e ambientais (HINRICHS e KLEINBACH, 2003):

- Combate ao êxodo rural através da capacidade de geração de emprego e renda, de melhorar a qualidade de vida, a educação e a saúde da sociedade local;
- Capacidade de aquecimento da economia regional e de desenvolvimento local;
- Surgimento e expansão de um novo mercado;
- Valorização das matérias-primas locais de biomassa (oleaginosas);
- Possibilitar investimentos em agronegócios;
- Maior base tributária e melhoria da balança comercial

Uma análise comparativa sumária das principais vantagens e limitações da tecnologia de geração a partir do óleo Diesel, conforme mostrado na tabela 6.

Tabela 6 - Principais vantagens e limitações da geração a partir do óleo Diesel e/ou biodiesel.

Principais vantagens	Principais limitações
Baixo custo inicial nos investimentos	Poluição sonora e do ar, desconforto no manuseio de combustível e óleo lubrificante;
Tecnologia madurecida e disseminada	Vulnerabilidade às externalidades: abastecimento sujeito às variações no preço de mercado, condições de transporte e logística;
Disponível no mercado	Necessidade de intervenção humana: operação e manutenção
Facilmente transportável	Altos e periódicos custos de operação e manutenção;
Adaptabilidade a cargas reativas ¹⁰	Possível redução da segurança e qualidade energéticas em casos limitantes de manutenção/abastecimento em regiões isoladas ou remotas

Fonte: Adaptado de ANEEL (2008) e Rodrigues (2006).

⁹ Derivado do petróleo

¹⁰ Provenientes da presença cargas capacitivas e indutivas, basicamente equipamentos eletrônicos e motores elétricos, que contribuem para um baixo fator de potência.

2.3.3 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERAÇÃO SOLAR

A energia solar é resultante de radiações eletromagnéticas¹¹ emitidas pelo Sol em todas as direções do espaço, e que chega à Terra com intensidade variável, face sua distância em relação ao Sol e disposição superficial. É máxima quando a superfície de captação intercepta perpendicularmente os raios solares, e é mínima quando a superfície de captação intercepta paralelamente os raios solares, conforme variação da latitude, da estação do ano, do horário do dia e da presença de nuvens (RESNICK e HALLIDAY, 1984).

A Terra, ao desenvolver seu movimento de translação, recebe aproximadamente 50% da radiação solar incidente, cerca de 1.360 W/m², valor medido a partir de uma superfície perpendicular em relação ao Sol, denominado de constante solar. Do total recebido pela atmosfera terrestre, aproximadamente 19% é absorvido pelas nuvens e outros gases e 31% é refletido ao espaço. A fração de luz refletida pela Terra e sua atmosfera é denominada de albedo. Ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte da energia solar manifesta-se sob a forma de luz visível e luz ultravioleta (HINRICHS e KLEINBACH, 2003).

A luz solar, de acordo com a teoria da natureza quântica da luz de *Einstein*, é considerada uma composição de múltiplos “pacotes” inteiros de energia denominadas de *fótons* ou *quantuns* de energia. E a energia E de n *fótons* em função da frequência dos fótons f ¹² pode ser calculada através da constante de Plank¹³, h , conforme representado na equação 1 (RESNICK e HALLIDAY, 1991).

$$E(f) = nhf \quad (1)$$

a) O efeito fotoelétrico nas células fotovoltaicas

A conversão da energia solar em energia elétrica é feita através do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico¹⁴, que se processa em materiais semicondutores, também chamados de células fotovoltaicas, conforme representação simplificada na figura 10.

¹¹ Ondas que se auto-propagam pelo espaço, algumas das quais são percebidas pelo olho humano, a exemplo da luz.

¹² $f = c/\lambda$, sendo c a velocidade da luz incidente, e λ seu comprimento de onda.

¹³ $h = 6,625 \times 10^{-34}$ J.s

¹⁴ Descoberto por *Becquerel* em 1839, demonstrado experimentalmente por Hertz em 1886-87, formalizado por Plank em 1900-01, expandido pela teoria dos fótons de Einstein em 1905, aplicado industrialmente com

No processo fotoelétrico, a luz solar incidente sobre a célula fotovoltaica pode deslocar elétrons livres das ligações atômicas destes semicondutores (ANEEL, 2008; GTES, 2004).

O silício, que dispõe de quatro elétrons na banda de valência, juntamente com o boro, que tem três elétrons na camada de valência, e o fósforo, que dispõe de cinco elétrons na camada de valência, são basicamente os materiais mais utilizados na fabricação de células fotovoltaicas convencionais utilizadas em painéis fotovoltaicos e diodos¹⁵.

Para que haja uma corrente elétrica é necessário que exista uma diferença de potencial, ou tensão, entre duas regiões da célula fotovoltaica. Tais regiões de potenciais diferentes são criadas através da introdução de impurezas, geralmente átomos de boro ou de fósforo, através de um processo conhecido como dopagem do silício. No referido processo, o boro é geralmente usado como dopante para criar a região tipo “p”, com déficit de elétrons, também conhecida região de “buracos” receptores de elétrons. Por tal motivo, o boro é conhecido como receptor de elétrons. O fósforo é o dopante geralmente usado para criar a região tipo “n”, com excedente de elétrons, também chamado de emissor de elétrons.

A figura 10 mostra que, sob radiação luminosa, a célula fotovoltaica gera pares “elétron-buraco” em ambos os lados da junção das regiões tipo “p” e tipo “n”, a junção “pn”. Ocorre que, na junção “pn”, os elétrons livres da região tipo “n” migram para a região tipo “p”, onde encontram os “buracos”, que por sua vez os capturam. Assim, há um acúmulo de elétrons na região tipo “p”, que fica negativamente carregada, e uma redução de elétrons na região tipo “n”, que fica positivamente carregada. Cria-se, então a diferença de potencial, que promove um fluxo de elétrons, que por sua vez cria um campo elétrico que limita o respectivo fluxo de elétrons entre as regiões “p” e “n”. Portanto, a junção “pn” separa os portadores com cargas opostas e transforma a corrente da fonte de geração I_S entre as bandas em uma corrente elétrica através da junção “pn” (CASTRO, 2004; GTES, 2004; KININGER, 2003; MALVINO, 1997, LANDER, 1988).

conquista espacial na década de 50, e em processo de atualização tecnológica a partir da crise energética da década de 70.

¹⁵ O diodo é um material semicondutor de potência construído com silício, cuja resistência elétrica diminui com o aumento da tensão e da temperatura. Possui uma curva de tensão-corrente não linear, calculada através da equação 2.

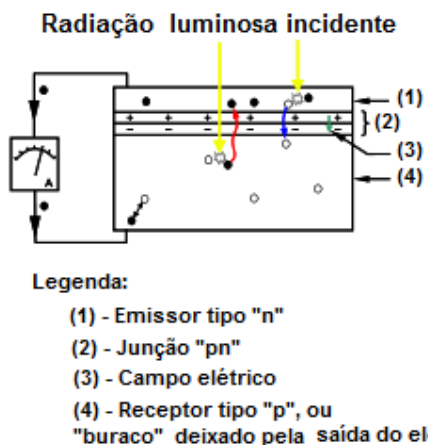


Figura 10 - Representação esquemática da célula solar fotovoltaica
Fonte: Adaptado de KININGER (2003)

b) Tecnologia de Geração fotovoltaica

A geração da corrente elétrica pela radiação solar incidente na célula fotovoltaica **Cfv** pode ser representada por uma fonte de corrente **Is** em paralelo com um diodo¹⁶ de silício **D**, representado na junção **pn**, com curva corrente (A) – tensão (V) característica mostrada na figura 11, porém, atuando especificamente na zona de condução de corrente deste, conforme representado graficamente no 1º quadrante da figura 11 (KININGER, 2003; MALVINO, 1997; LANDER, 1988).

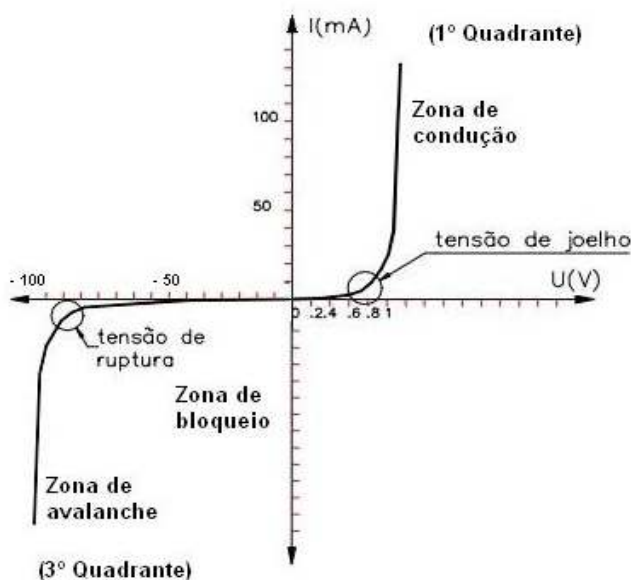


Figura 11 - Representação da curva $I(V)$ de um diodo de silício.
Fonte: Adaptado de KININGER (2003), MALVINO (1997), LANDER (1988).

¹⁶ Semicondutor de potência construído com silício, cuja resistência elétrica diminui com o aumento da tensão e da temperatura. Possui uma curva de tensão-corrente não linear, calculada através da equação 2.

O circuito equivalente da célula fotovoltaica C_{fv} pode ser representado pela figura 12, onde S representa a fonte de geração de corrente elétrica I_S da célula fotovoltaica, em paralelo com o diodo de silício D , sendo V_D e I_D as representações das respectivas tensão e corrente deste. A impedância Z da carga a ser alimentada pela célula fotovoltaica C_{fv} , e suas respectivas corrente I_Z e tensão V_Z também são mostradas.

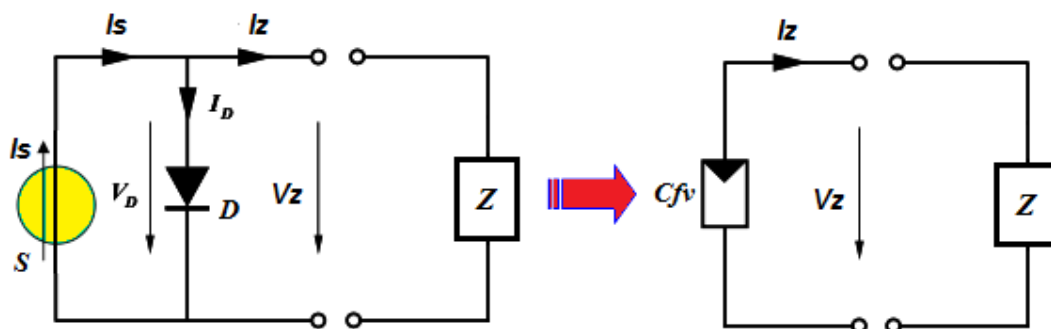


Figura 12 - Representação do circuito equivalente da célula solar fotovoltaica
Fonte: Adaptado de KININGER (2003).

A célula fotovoltaica apresenta um comportamento semelhante a um diodo de silício operando na zona de condução, podendo ser caracterizada pela curva de corrente $I(V)$ no primeiro quadrante do gráfico da figura 11, representada pelo circuito elétrico equivalente da figura 12.

É possível observar na figura 12 que a corrente do circuito, que flui através do diodo, caracterizado na figura 11, pode ser matematicamente definida com boa aproximação pela equação 2 (CASTRO, 2004; KININGER, 2003):

$$I_D(V, T) = I_{SatD} \cdot \left[e^{(qV/kT)} - 1 \right] \quad (2)$$

Onde I_D representa variação da corrente do diodo com a diferença de potencial nos seus terminais, q a carga do elétron (aproximadamente $1,6 \cdot 10^{-19}$ C), V a diferença de potencial aplicada nos terminais do diodo (no caso do silício é de aproximadamente 0,7 Volts), k a constante de Boltzmann (aproximadamente $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T a temperatura da junção em graus Kelvin (K). A tensão e a corrente são consideradas positivas quando o dispositivo encontra diretamente polarizado, com uma tensão terminal V_D positiva, correspondendo à região do 1º quadrante do gráfico

representado na figura 10a, na qual a corrente I_D do diodo D tem uma forma praticamente exponencial. I_{SatD} representa a corrente de saturação do diodo de silício (GTES, 2004; KININGER, 2003; MALVINO, 1997; LANDER, 1988).

De acordo com a figura 11, a diferença de potencial sobre o diodo de silício V_D pode ser representada pela equação 3 (GTES, 2004; EDMINISTER, 1991; O'MALLEY, 1983; HAYT Jr. e KEMMERLY, 1975):

$$V_D = k T / q \quad (3)$$

Assim, conforme a figura 11, a diferença de potencial V_Z sobre a carga Z é equivalente a V_D , e pode ser representado através da equação 4.

$$V_Z = V_D = k T / q \quad (4)$$

A figura 11 mostra que a corrente I_Z , que flui *através* da carga de impedância Z , equivale à diferença entre a corrente gerada pela célula fotovoltaica I_{fv} e corrente que flui através do diodo I_D , representado pela equação 5.

$$I_Z(V, T) = I_S - I_D = I_S - I_{SatD} \left[e^{(qV/kT)} - 1 \right] \quad (5)$$

Portanto a potência da carga Z_p pode ser definida pelo produto de sua corrente I_Z por sua tensão V_Z , expressa pela equação 6:

$$P_Z(I, V) = I_Z \cdot V_Z \quad (6)$$

Contudo, a partir da análise do circuito equivalente da figura 12 é possível que as características $I-V$ apresentam dois pontos importantes: a corrente de curto-circuito I_{sc} , e a tensão de circuito aberto V_{oc} . Mostrados na figura 13.

No caso da corrente de curto-circuito I_{sc} , corrente plenamente gerada pela célula fotovoltaica através da radiação solar, e verificada quando os terminais encontram-se em curto-circuito ($Z_{sc} = 0$), fazendo com que a corrente do diodo I_D tenda a zero ($I_D = 0$). Assim, a corrente da célula fotovoltaica tem seu valor máximo (I_{sc}) neste ponto, conforme representado na equação 7, e ilustrado na figura 13.

$$I_{sc}(V, T) = I_S = I_{mp} \quad (7)$$

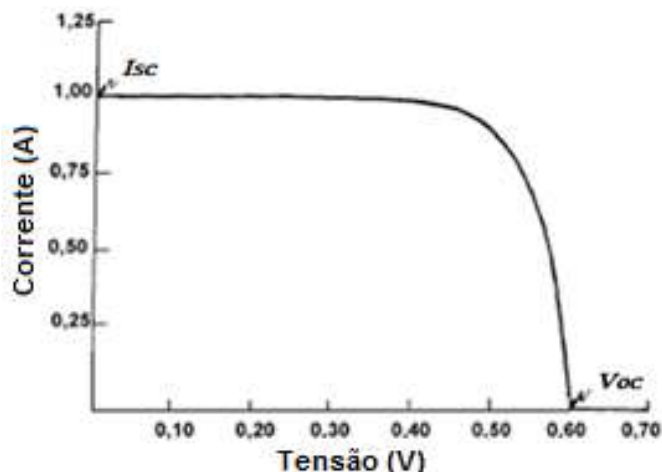


Figura 13 - Representação da curva de Tensão-Corrente de uma célula fotovoltaica
Fonte: Adaptado de KININGER (2003).

O segundo ponto é representado pela condição de tensão de circuito aberto V_{OC} , verificada quando a impedância Z tende para uma carga infinitamente grande ($Z = \infty$), impedindo o fluxo de corrente entre seus terminais do circuito da célula fotovoltaica ($I_z = 0$). Assim, a tensão (diferença de potencial) da célula fotovoltaica tem seu valor máximo neste ponto, V_{OC} , conforme representado na equação 8, mostrado na figura 13.

$$V_{OC} = (kT/q) \ln(1 + (I_s/I_{SatD})) = V_{mp} \quad (8)$$

Contudo, nenhuma potência é gerada sob curto-circuito ou sob circuito aberto. A potência máxima $P_{m\acute{a}x}$ produzida pela célula fotovoltaica é alcançada em um ponto característico onde o produto da corrente pela voltagem seja máximo, ou seja, onde a corrente e a voltagem tenham simultaneamente valores máximos, respectivamente, I_{mp} e V_{mp} . A posição do *ponto de potência máxima* encontra-se representada na equação 9, e mostrada na figura 14.

$$P_{m\acute{a}x}(V, I) = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (9)$$

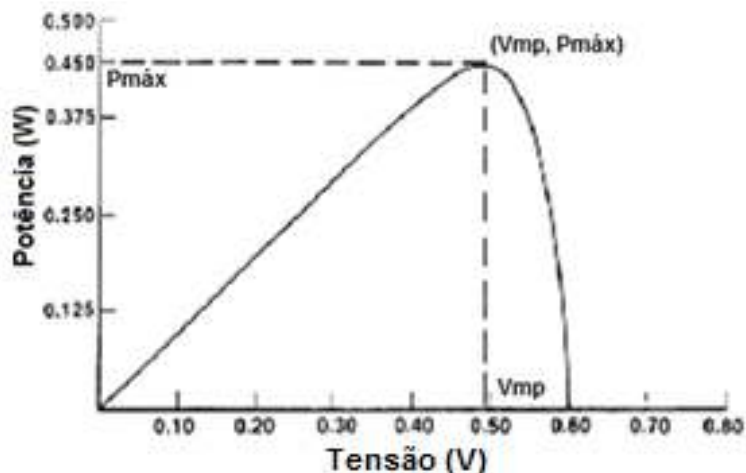


Figura 14 - Representação da curva de Tensão-Potência de uma célula fotovoltaica
Fonte: Adaptado de KININGER (2003).

Os valores de V_{mp} e I_{mp} podem ser respectivamente estimados em função de V_{oc} e I_{sc} . V_{mp} pode variar de 75% a 90% de V_{oc} , e I_{mp} pode variar de 85% a 95% de I_{sc} , conforme mostrado na figura 15. Podem ainda ser tecnicamente relacionados a partir um fator de qualidade da célula fotovoltaica, FQ, conforme representado na equação 10 (KININGER, 2003):

$$FQ = (V_{mp} \cdot I_{mp}) / (V_{oc} \cdot I_{sc}) \quad (10)$$

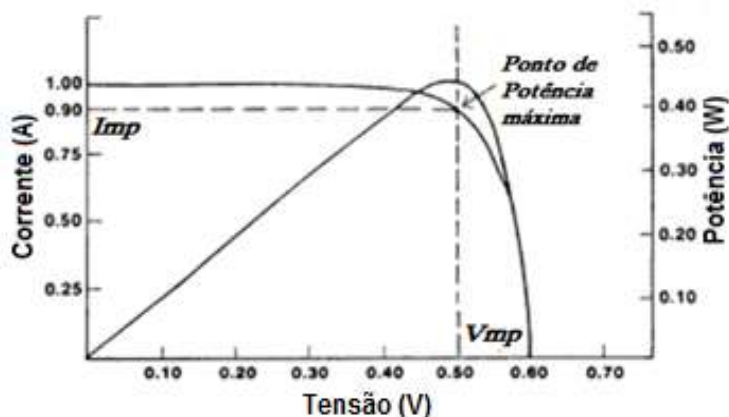


Figura 15 - Representação da curva de máxima potência do painel fotovoltaico
Fonte: Adaptado de KININGER (2003).

A estimativa da energia produzida através dos painéis fotovoltaicos pode ser estimada a partir da equação 11.

$$E(G, T, t) = \eta_{\text{PainelFV+Inversor}} \sum_{i=1}^n P_{\text{max}_i}(G, T) \cdot t_i \quad (11)$$

Onde, $E(G, T, t)$ representa a estimativa de energia a ser produzida, em função da radiação solar incidente G , da temperatura T da célula no intervalo de tempo considerado t , $\eta_{\text{PainelFV+Inversor}}$ representa o rendimento do ponto de máxima potência juntamente com o inversor, n representa o número de períodos de tempo considerado, t representa i intervalo de tempo considerado, e $P_{\text{max}}(G, T)$ representa a potência máxima do módulo em função da radiação solar incidente G e da temperatura T da célula no intervalo de tempo t considerado (CASTRO, 2004; KININGER, 2003).

c) O Potencial de Radiação Solar do Brasil e do Ceará

O Brasil, em relação à Alemanha, país líder na aplicação da tecnologia fotovoltaica e de mecanismos de incentivo às energias renováveis, apresenta algumas vantagens significativas, principalmente no que diz respeito aos níveis de radiação solar e a extensão territorial, conforme análise comparativa das figuras 17 e 18. Nas respectivas figuras é possível observar que os menores índices de radiação solar do Brasil ainda são maiores que os melhores índices de radiação solar da Alemanha, conforme é mostrado nas figuras 17 e 18 (SALAMONI e RUTHER, 2007).

Segundo a ANEEL (2008), o Brasil é naturalmente privilegiado em termos de radiação solar, dispondo de um grande potencial solar capaz de aproveitamento energético, favorecido por sua vasta extensão territorial, condições climáticas e geográficas. A estimativa do potencial de radiação solar no Brasil varia de 1420 a 2230 kWh/m²/ano. Em relação ao Brasil, o Ceará apresenta os melhores índices de radiação solar, variando de 1825 a 2230 kWh/m²/ano, conforme figura 17.

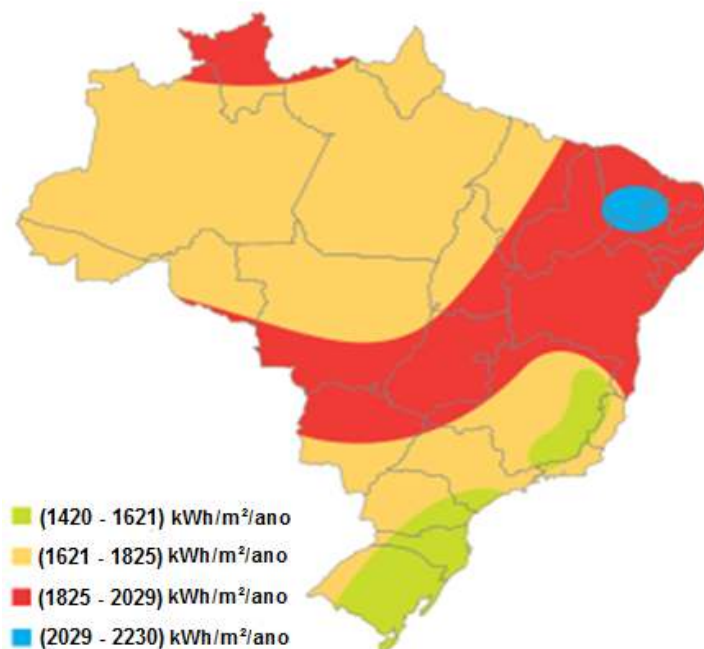


Figura 16 - Radiação solar média (kWh/m²/ano) do Brasil
 Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

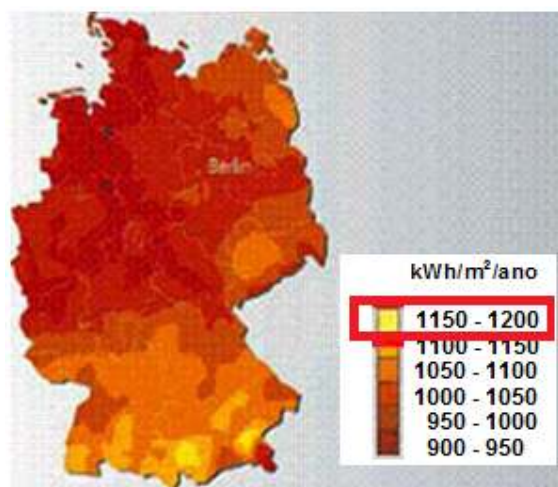


Figura 17 - Radiação solar média (kWh/m²/ano) da Alemanha
 Fonte: Adaptado de SALAMONI e RUTHER (2007).

O Ceará caracteriza-se por apresentar irregularidade na distribuição temporal e espacial de sua precipitação chuvosa, uma temperatura média anual de 28°C, uma insolação superior a 2.800 horas/ano, e um potencial solar de aproximadamente 2000 kWh/m²/ano. No período de abril de 2003 a março de 2004, apresentou um índice de radiação solar máximo de 6,56 kWh/m²/dia, ocorrido em set/03, dentro de uma faixa intermediária do período seco. Seu menor índice de radiação solar foi de 2,97 kWh/m²/dia, ocorrido em fev/03, numa faixa intermediária

do período chuvoso. Sua radiação solar média foi de 5,22 kWh/m²/dia, conforme mostrado na figura 18 (CARVALHO, P. C. M., *et al*, 2004).

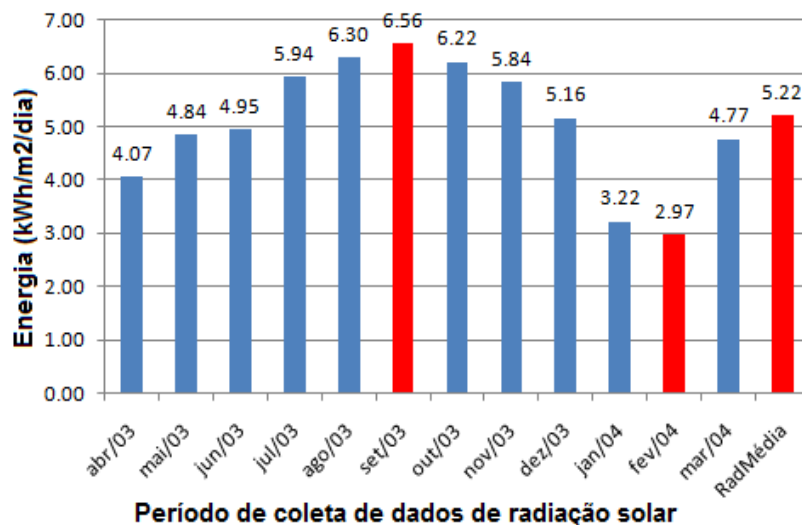


Figura 18 - Potencial da radiação solar no Ceará
Fonte: Adaptado de CARVALHO *et al* (2004).

Contudo, o Ceará apresenta uma série de vantagens com relação aos demais Estados do Brasil no que diz respeito aos níveis de radiação solar e oportunidades de geração de emprego e renda, face menor custo da mão-de-obra e alguns incentivos fiscais estaduais para indústrias e grandes empreendimentos que queiram se instalar no Estado do Ceará.

d) Principais aplicações de energia solar fotovoltaica

O atual desenvolvimento tecnológico na área de energias renováveis parece representar uma boa solução para aumentar a eficácia das ações a serem desenvolvidas no meio rural Brasileiro ou para edificações privadas e comunitárias.

As aplicações de energia solar fotovoltaica têm um importante papel ao prover eletricidade para inúmeras aplicações domiciliares, rurais, sistemas de comunicação, dentre outras. Entretanto, o uso de aplicações produtivas, especificamente na área rural, ainda é restrito. A maioria de máquinas e motores elétricos convencionais são projetados tradicionalmente para conexão à rede elétrica de distribuição. Infelizmente, grande parte dos fabricantes de tais equipamentos ainda dedica pouca atenção ao bom desempenho e baixo consumo dos mesmos

Os sistemas convencionais de eletrificação rural, extensão da rede elétrica e/ou geração a partir de óleo Diesel, permitem flexibilidade no suprimento de uma demanda possivelmente superior à especificada, e/ou adição e utilização de componentes elétricos de baixo fator de potência (ineficientes), sem a necessidade de grandes investimentos adicionais ou comprometimento do resultado final, como por exemplo, iluminação rural e sistema de bombeamento d'água residencial rural e agro-pecuária.

Devido à maturidade técnico-mercadológica da geração de eletricidade a partir do óleo Diesel, tais os componentes são relativamente baratos e acessíveis. Contudo, o consumo de energia elétrica e de combustível Diesel, e respectivo custeio, ficam sob monitoramento e controle por parte do usuário final.

Mas, efetuar a simples troca do sistema convencional para o sistema de eletrificação por geração solar pode não ser eficaz, eficiente e nem financeiramente viável. Critérios técnicos de dimensionamento e respectivos custos devem ser considerados.

Apesar da moderna tecnologia e amplamente comercializados, os sistemas fotovoltaicos ainda precisam ser aperfeiçoados, projetados e adequados para uma aplicação específica. Ao contrário da eletrificação convencional, a geração solar fotovoltaica é limitada e dimensionada em função do respectivo. É depende da potência dos equipamentos elétricos utilizados. Logo, os componentes de um sistema de eletrificação a partir de geração solar precisam ser dimensionados segundo a real necessidade do usuário. Do contrário, haverá falhas na implantação do projeto, as quais serão observadas mediante funcionamento inadequado de equipamentos elétrico após instalação do sistema. A respectiva retificação pode apresentar-se financeiramente inviável.

A população do interior, com ênfase do meio rural, vem sofrendo há vários anos um quadro de empobrecimento e limitado acesso a recursos mais acessíveis nos grandes centros de consumo de eletricidade. Assim, aplicações práticas que possam favorecer a produção agrícola, o desenvolvimento da pecuária, a educação, a telecomunicação, a saúde e a geração de emprego e renda para a sociedade do meio rural devem ser melhor e profundamente analisadas.

Alguns sistemas a partir de geração solar fotovoltaica são úteis para aplicações produtivas, e já têm alcançado alguma maturidade técnico-operacional que os possibilitam ser utilizados com reduzidas limitações:

- Sistemas rurais de iluminação residencial, comercial e educacional;
- Sistemas de eletrificação para bombeamento d'água;
- Sistemas de telecomunicações e informatização (ilhas digitais);
- Eletrificação de cercas para facilitar a pecuária no meio rural.

Contudo, vale ressaltar que cada projeto deverá passar por uma análise de critérios técnicos, sociais, financeiro-econômicos e ambientais.

A figura 19 mostra o conjunto de painéis fotovoltaicos instalados no pátio do Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas (MCFA) no Campus do Itaperi da Universidade Estadual do Ceará (UECE)



Figura 19 - Conjunto de painéis fotovoltaicos instalados nas dependências do MCFA/UECE, Campus do Itaperi.

e) Principais vantagens e limitações da geração solar fotovoltaica

Dentre as principais vantagens dos sistemas de eletrificação a partir de geração solar encontram-se o respectivo tempo de vida útil do sistema, em média 25 anos. Tal vantagem decorre do fato de não possuírem engrenagens para produção de atritos mecânicos, e apresentar baixíssima manutenção, muitas vezes necessitando apenas de limpeza da superfície do painel fotovoltaico, para melhorar

captação da radiação solar. Outra vantagem é a possibilidade de armazenamento de energia potencial hidráulica em caixas d'água suspensas e/ou eletricidade em banco de baterias. Os respectivos impactos ambientais são bastantes reduzidos quando comparado às demais tecnologias.

As principais desvantagens referem-se aos respectivos custos de implantação, à variabilidade de disponibilidade do potencial solar ao longo do tempo de utilização, mais evidentemente ao longo do dia, e as condições climáticas desfavoráveis de chuvas e nuvens. Quanto ao armazenamento de eletricidade através de banco de baterias, evidenciam-se elevados custos de substituição destas.

A energia solar fotovoltaica integrada à rede elétrica surge como uma grande promessa para a geração distribuída. As técnicas para sua aplicação parecem dominadas. É importante normalizar a geração distribuída, nos aspectos de qualidade, segurança e proteção. Ela representa uma alternativa viável para locais onde não há acesso a energia convencional e o consumo é baixo, mas a maior dificuldade ainda reside no custo das células. Considera-se que a geração torna-se competitiva a partir de 5.400 R\$/kW, em relação à tarifa de fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2008).

O governo do Estado do Ceará, com o objetivo de estimular a geração estadual de energia solar, destinou R\$ 10 milhões do Orçamento de 2008 para o Fundo de Incentivo à Energia Solar do Ceará (FIES) (O POVO, 2009). A empresa MPX Solar inaugurou em março de 2010 a Usina Solar no município cearense de Tauá, que contou com apoio do Governo do Estado do Ceará, do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e da Prefeitura de Tauá. Esta usina elétrica apresenta-se como a primeira unidade na modalidade solar da América do Sul. O projeto piloto recebeu um investimento inicial de R\$ 12 milhões, tem uma potência de 1 MW, mas tem capacidade de chegar a 5 MW, já autorizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O projeto piloto, com potência e 1 MW, e conta com o apoio do Governo do Estado, do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e da Prefeitura de Tauá (UECE, 2010).

2.3.4 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE GERAÇÃO EÓLICA

A energia eólica pode ser basicamente definida como a aquela que provém do fluxo de ar, o vento. Os ventos são formados pelos deslocamentos das

massas de ar a partir de suas variações de temperaturas e pressão na superfície e atmosfera da Terra, originados pela radiação solar. Assim, ela é uma forma indireta da energia solar (ANEEL, 2008)

Tais deslocamentos das massas de ar ocorrem basicamente em função da radiação solar que aquece a superfície terrestre, e esta por sua vez transfere calor às camadas superficiais de ar, provocando aumento da pressão das massas de ar e expansão destas em direção às zonas de menor pressão (CARVALHO, 2003).

Os ventos locais são dependentes das variações de temperatura, pressão e relevo locais, podendo ser basicamente classificados em brisas “mar-terra” e “montanha-vale” (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

a) O potencial de energia eólica no Brasil

O Brasil é naturalmente favorecido com um grande potencial eólico, aproximadamente 272,2 TWh/ano.

O Nordeste do Brasil (NEB) dispõe dos melhores índices de potencial eólico no contexto brasileiro, aproximadamente 144,29 TWh/ano, conforme mostrado na figura 20 (ANEEL, 2008).

O Estado do Ceará, localizado na região semi-árida do Nordeste do Brasil (NEB), possui uma área total é de 148.825,6 km², que equivalente a 9,57% da área do NEB, e 1,74% da área do Brasil (SEINFRA/CE, 2009).

Em termos de empreendimentos eólicos, o Ceará dispõe de 62.730 kW inaugurados, 41.700 kW operando sem inauguração, totalizando 104.430 kW. (O POVO, 05/04/2009). Cinco novos parques eólicos serão instalados no Ceará ainda em 2010, mais especificamente nas cidades de Amontada e Trairi, ambas situadas no litoral oeste cearense (O POVO, 2010).



Figura 20 - Potencial eólico do Brasil
Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

b) Tecnologia de Geração Eólica

Analogamente à geração hidráulica, que tem a água como fluido, a geração eólica tem o ar como fluido.

A geração eólica processa-se basicamente pela transferência da energia cinética presente na massa de ar em movimento, o vento, para as pás do rotor da turbina eólica, que ao girarem, originam a energia mecânica de rotação, que aciona o rotor do gerador eólico, e este, por sua vez, gera eletricidade.

Assim, uma turbina eólica capta parte da energia cinética contida na massa de ar (m) do vento que flui com velocidade (v) através da área (A) varrida pelas pás do rotor, transformando-a em energia mecânica de rotação E_c , que é proporcional à massa de ar m e ao quadrado da velocidade do vento v , conforme representado na equação 12 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002; CARVALHO, 2003):

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (12)$$

O eixo do rotor acionando o gerador elétrico transforma uma parte desta energia mecânica de rotação (E_c) em energia elétrica. O potencial eólico disponível

P pode ser estimado em função da densidade do ar “ ρ ”, da área “ A ” varrida pelas pás do rotor e da velocidade do vento V elevada ao cubo, conforme equação 13 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002; CARVALHO, 2003):

$$P(\rho, A, v) = \frac{A \cdot \rho \cdot v^3}{2} \quad (13)$$

A viabilidade técnica para aproveitamento do potencial eólico parte da avaliação da estimativa da produção de energia elétrica de um determinado projeto eólico, com base na curva de potência (exemplificada na figura 23) do respectivo aerogerador.

A curva de potência de uma turbina eólica ou aerogerador, normalmente fornecida pelo respectivo fabricante, relaciona a potência elétrica gerada com a velocidade do vento. Ela apresenta três pontos importantes: a velocidade do vento para início da produção ($v_{entrada}$), a velocidade nominal (v_{nom}), e a velocidade de corte (v_{saida}) da produção. O controle da velocidade de corte é feito mediante ativação do sistema limitador automático para velocidades de vento superiores a velocidade nominal (ANEEL, 2008; CARVALHO, 2003; MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

A produção total de energia elétrica E_{total} , exemplificada na figura 24, pode ser estimada em função da potência P_i obtida a partir da curva de potência do aerogerador, da distribuição de frequência estatística que caracteriza a amplitude das velocidades de vento f_i para o local especificado para instalação do projeto eólico, e do período total de tempo t_i considerado, conforme equação 14.

$$E_{Total} = \sum_{i=0}^n P_i \cdot f_i \cdot t_i \quad (14)$$

Na equação 16, P_i representa a potência fornecida pela curva de potência da instalação para a classe de velocidade do vento v_i , e f_i representa a frequência relativa de cada classe de velocidade do vento v_i , calculada através da equação 15.

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (15)$$

Na equação 15, t_i representa o período de tempo no qual foi registrada a classe de velocidade do vento v_i .

A figura 21 exemplifica uma turbina eólica de eixo horizontal, apresentando seus principais componentes:

- **pás do rotor:** capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo;
- **eixo:** transfere a energia rotacional para o gerador eólico;
- **nacele:** é a carcaça que abriga os seguintes componentes:
 - **caixa de engrenagens:** aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;
 - **gerador:** usa a energia rotacional do eixo para gerar eletricidade usando eletromagnetismo;
 - **unidade de controle eletrônico** (não mostrada): monitora o sistema, desliga a turbina em caso de mau funcionamento e controla o mecanismo de ajuste para alinhamento da turbina com o vento;
 - **controlador** (não mostrado): move o rotor para alinhá-lo com a direção do vento;
 - **freios:** detêm a rotação do eixo em caso de sobrecarga de energia ou falha no sistema.
- **torre:** sustenta o rotor e a nacele, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- **equipamentos elétricos:** transmitem a eletricidade do gerador através da torre e controlam os diversos elementos de segurança da turbina.

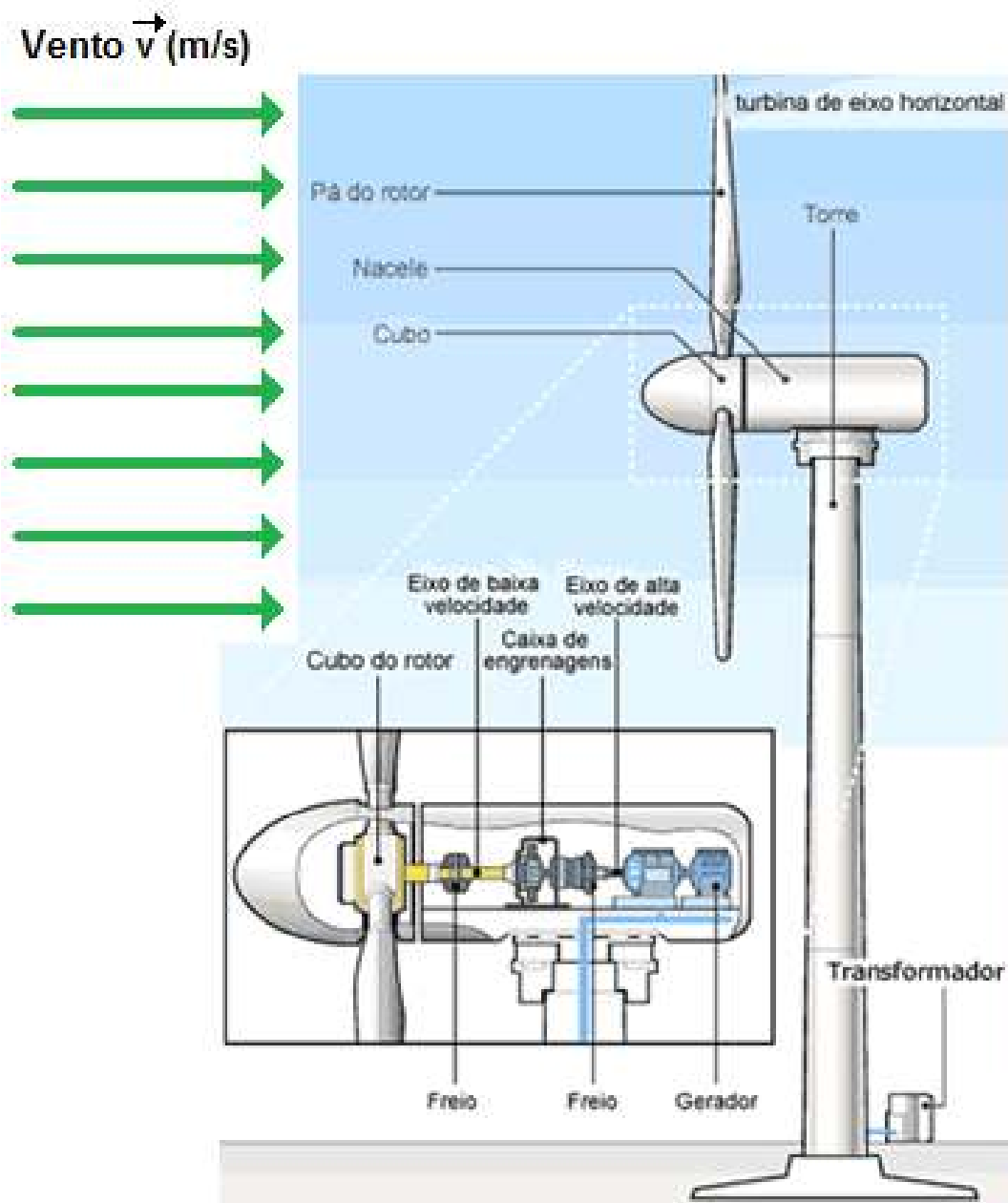


Figura 21 - Representação de uma turbina eólica de eixo horizontal
 Fonte: Adaptado de ANEEL(2008), MANWELL, MCGOWAN e ROGERS (2002).

A figura 22 apresenta uma aplicação de geração eólica com o aerogerador ENERSUD GERA246, de 1 kW de potência, em sistema eólico para bombeamento d'água e armazenamento de energia potencial hidráulica do Laboratório de Energias Alternativas da UFC (REIS, OLIVEIRA JR. e CARVALHO, 2010).



Figura 22 - Aplicação do aerogerador ENERSUD GERA246 de 1 kW de potência em pesquisa de desempenho em bombeamento d'água e armazenamento de energia potencial hidráulica do Laboratório de Energias Alternativas da UFC.

As figuras 23 e 24 apresentam respectivamente as curvas de potência e de produção de eletricidade, ambas em função da velocidade do vento, do aerogerador ENERSUD GERAR246, de 1 kW de potência nominal.

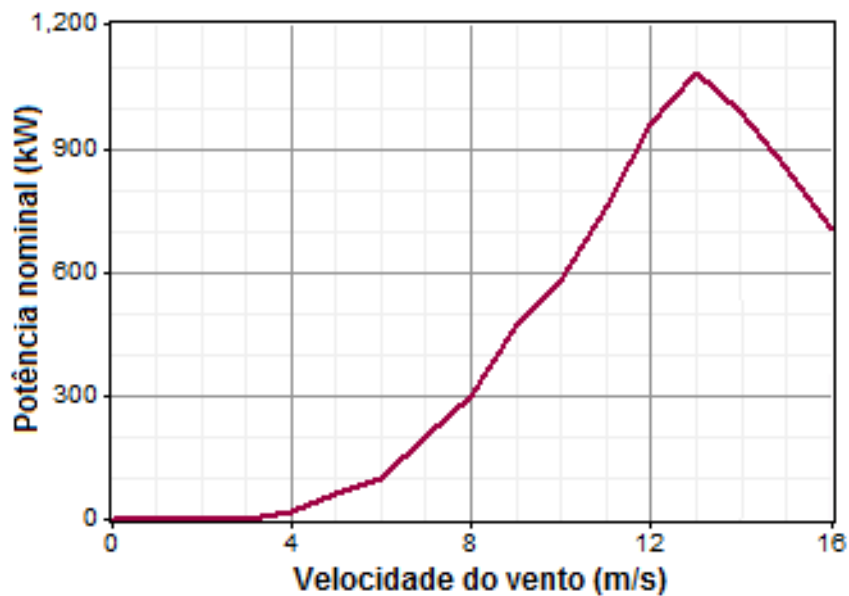


Figura 23 - Curva de Potência do Aerogerador ENERSUD de 1kW.
 Fonte: Adaptado de HOMER (2010), REIS, OLIVEIRA JR. e CARVALHO (2010) e <http://enersud.com>, em 02/01/2010.

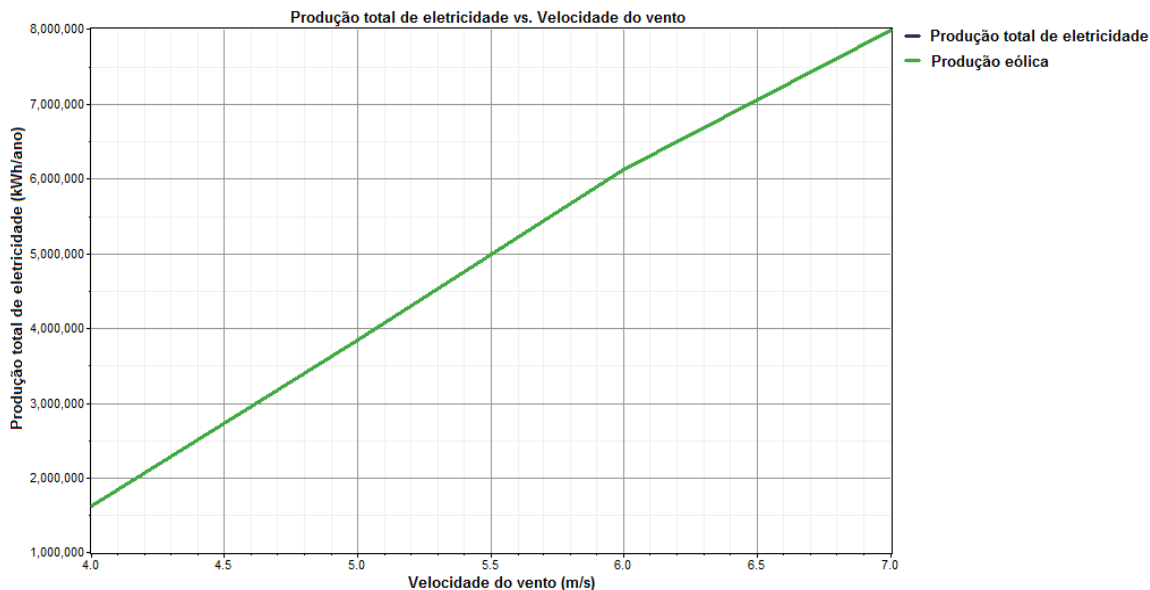


Figura 24 - Curva de Produção de Energia do Aerogerador ENERSUD de 1kW
 Fonte: Fonte: Adaptado de HOMER (2010), REIS, OLIVEIRA JR. e CARVALHO (2010) e ENERSUD (2010).

c) Aplicação da Distribuição de Weibull na Geração Eólica

A função de densidade de probabilidade de Weibull é bastante utilizada em projetos eólicos por ajustar freqüentemente bem as distribuições de medidas da velocidade do vento. Ela é utilizada basicamente para caracterizar a amplitude da distribuição de velocidades de vento, conforme equação 18 (CARVALHO, 2003; MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \left(\exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \right) \quad (16)$$

Na equação 18, v representa a velocidade de vento, k é fator de forma, um número adimensional relacionado com a forma da curva, e c é o fator de escala, relacionado com a velocidade média do vento e com as mesmas unidades desta.

O gráfico mostrado na figura 25 mostra exemplos de distribuições de Weibull, todas com a mesma velocidade média do vento, 6 m/s, mas cada uma com diferente valor para o fator de forma k , variando de 1.5 a 3.5. O referido gráfico mostra ainda que valores mais baixos de k correspondem a distribuições mais largas.

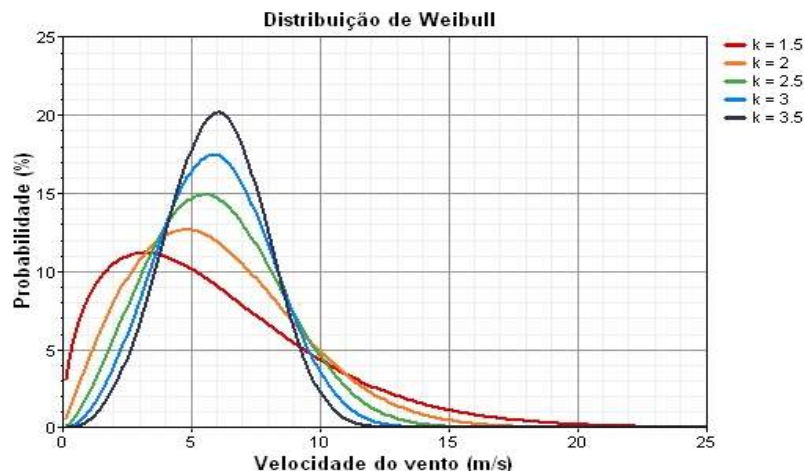


Figura 25 - Distribuições de Weibull para estimativa da velocidade do vento
 Fonte: Adaptado de MANWELL, MCGOWAN e ROGERS (2002).

A figura 26 mostra uma distribuição típica de velocidades de vento e o melhor ajuste através da distribuição de Weibull, anteriormente representada na curva na cor verde da figura 25.

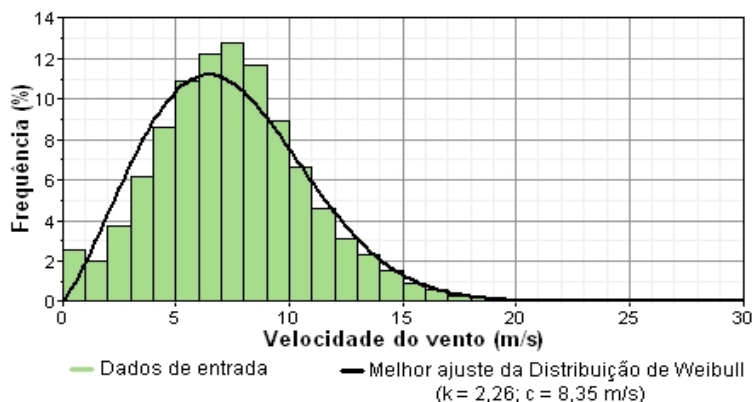


Figura 26 - Representação do melhor ajuste através da distribuição de Weibull
 Fonte: Adaptado de MANWELL, MCGOWAN e ROGERS (2002).

d) Tecnologias aplicadas na estimativa do Potencial Eólico

De acordo com a tecnologia atual, a maioria dos aerogeradores utiliza velocidades de ventos a partir de 2,5 m/s para a geração de energia elétrica. Velocidades de vento abaixo do referido valor não justificam o alto investimento financeiro, pois apresentam baixo aproveitamento energético para produção de eletricidade (ANEEL, 2008).

O método mais usual de se estimar a velocidade do vento v em altura h é através da função logarítmica considerando com variáveis a velocidade de referência medida v_{ref} através de um anemômetro instalado na altura de referência h_{ref} , e o fator de rugosidade inerente ao tipo de terreno e/ou vegetação do solo local z_0 , conforme equação 16 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002):

$$v(h) = v_{ref} \left(\frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \right) \quad (17)$$

Também pode ser aplicada a função de potência para se estimar a velocidade do vento v , conforme equação 17. Mas este método requer outro ponto de medição da velocidade local $v_0(h_0)$, o que o torna um pouco mais oneroso, embora justificável em aplicações com torres eólicas a partir de 40 metros de altura, conforme é mostrado na figura 27 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002):

$$v(h) = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\left(\frac{\ln(v_0/v_{ref})}{\ln(z_0/z_{ref})} \right)} \quad (18)$$

A figura 27 permite uma análise comparativa entre estes dois métodos de estimativa da velocidade em função da altura acima do solo.

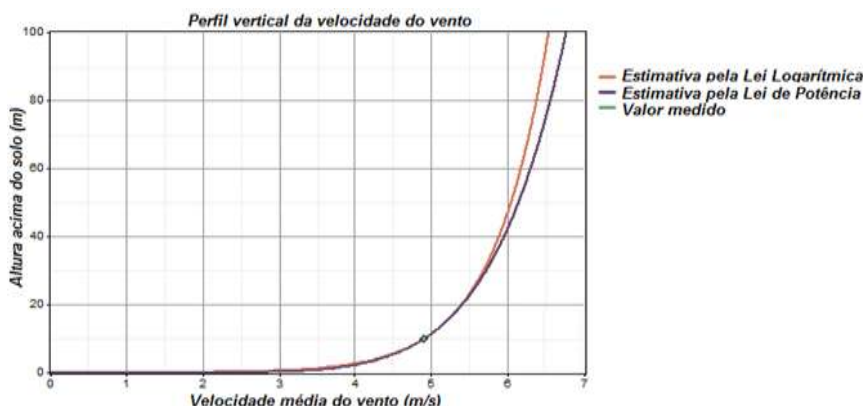


Figura 27 - Análise comparativa entre os métodos logarítmico e de potência para estimativa da velocidade do vento em função da altura acima do solo.

e) Principais vantagens da geração eólica

A geração eólica caracteriza-se por ser uma forma energética limpa e associada ao forte crescimento na escala industrial de produção e montagem de aerogeradores com custos progressivamente decrescentes.

Graças aos avanços tecnológicos e ao seu considerável potencial renovável ela tornou-se uma fonte energética com uma das maiores taxas de crescimento¹⁷ em capacidade geradora de energia elétrica. Mas seu desenvolvimento tecnológico e uso crescente na eletrificação são também motivados por seus baixíssimos impactos ambientais, os quais vêm sendo minimizados simultânea e paralelamente ao progresso tecnológico.

Dentre suas principais vantagens, apresentam-se:

- Reduzida emissão de ruídos de origem mecânica e aerodinâmica, face melhorias tecnológicas nas engrenagens mecânicas e na aerodinâmica das respectivas pás;
- Reduzidos impactos ambientais: os danos à fauna, basicamente à pássaros que se chocam nas pás de turbinas eólicas, foram praticamente resolvidos para as turbinas de parques eólicos, com a adoção de menores velocidades angulares nos rotores, o planejamento de parques eólicos adequadamente localizados em áreas não sujeitas a migração e/ou habitação. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis aos pássaros em vôo, e assim possíveis de serem evitadas.
- Uso racional e criterioso da terra na instalação de turbinas eólicas para evitar perturbação fluídica no escoamento do vento por unidades eólicas instaladas a jusante, também chamado de “efeito esteira”.

Os avanços tecnológicos, principalmente nos sistemas de transmissão, na melhoria da aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas, têm contribuído para reduzir os custos de manutenção, melhorar o desempenho e aumentar a confiabilidade dos equipamentos. Assim, a expectativa é de que a energia eólica venha a torna-se cada vez mais economicamente competitiva (ANEEL, 2008).

A geração eólica pode contribuir para eletrificação urbana e rural como alternativa sócio-econômica e tecnicamente viável, seja na aplicação integrada ao sistema elétrico, através de parques eólicos, seja de forma isolada.

¹⁷ Na ordem de 28% nos últimos anos (PNE 2030)

2.3.5 ELETRIFICAÇÃO A PARTIR DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Sistemas híbridos são basicamente os sistemas constituídos de duas ou mais fontes de geração de energia, convencionais e/ou não convencionais, como por exemplo geração solar fotovoltaica, eólica, a óleo Diesel, biocombustíveis dentre outras. Sua composição pode variar em função da disponibilidade de recursos naturais renováveis ou não, tecnológicos e sócio-econômicos. Seu objetivo é produzir o máximo de energia possível das fontes renováveis, mantendo a qualidade e a confiabilidade especificadas para cada projeto. Sua utilização e escolha da composição das mesmas dependem fundamentalmente da disponibilidade de recursos energéticos, de modo que pelo menos um deles possa complementar a eventual falta ou insuficiência energética de um ou mais componentes do sistema (BARBOSA, *et al*, 2004).

O sistema híbrido proposto nesta dissertação, em termos de geração de eletricidade, pode combinar painéis fotovoltaicos, que produzem eletricidade em corrente contínua (DC), aerogeradores, que podem produzir eletricidade em corrente contínua (DC) ou alternada (AC), e grupo gerador a biodiesel, que produz eletricidade em corrente alternada (AC). Para associar tais fontes de eletricidade, a carga e banco de baterias, cuja corrente é contínua (DC), o sistema precisa do conversor de potência, que permitam adequar as correntes entre os equipamentos.

A eletricidade produzida e consumida entre os componentes dos sistemas pode ser associada ou relacionada com determinadas pontos de ligação do sistema, chamados barramento. Sendo assim, o sistema pode apresentar um barramento de corrente contínua (DC) e outro de corrente alternada (AC), os quais identificam o ponto de ligação comum entre os equipamentos do sistema (GARCÍA, 2004).

A figura 28 mostra detalhes de alguns dos equipamentos utilizados em aplicações de sistema híbridos junto ao Laboratório de Energias Alternativas da UFC.



Figura 28 - Alguns dos equipamentos utilizados em aplicações de sistema híbridos junto ao Laboratório de Energias Alternativas da UFC.

As fontes renováveis de energia solar e a eólica são inextinguíveis, não poluentes e quando exploradas apresentam um mínimo impacto ambiental. Porém são intermitentes, apresentam interrupções, sendo interessante a complementação energética entre as fontes disponíveis (GARCÍA, 2004).

O estudo de sistemas híbridos apresenta vantagens em relação aos sistemas singelos, principalmente nas aplicações de suprimento de eletricidade a sistemas descentralizados da rede elétrica, a fim de que na ocorrência de uma eventual falta ou insuficiência energética de uma ou mais fonte(s) seja(m) complementada(s) pela(s) outra(s) fonte(s) que compõem o sistema (BARBOSA *et al*, 2004; GARCÍA, 2004).

Dentre as principais vantagens de sistemas híbridos sobre os sistemas singelos apresentam-se (MACÊDO e PINHO, 2003):

- Complementaridade entre as fontes que compõem o sistema: a intermitência das fontes envolvidas pode ser parcial ou totalmente superada, garantindo a continuidade e a qualidade da eletricidade produzida pelo sistema híbrido;
- Modularidade das fontes envolvidas: os módulos fotovoltaicos, aerogeradores, grupo geradores a biodiesel e baterias podem ser adquiridos gradativamente ao sistema, desde que haja crescimento natural da demanda, conforme disponibilidade de recursos financeiros, potencial energético e área para instalação dos respectivos.

Os sistemas híbridos que utilizam fontes de energia renováveis, a exemplo de solar, eólica e biodiesel, podem mostrar-se uma alternativa viável para o suprimento de energia elétrica de localidades remotas e/ou isoladas do sistema elétrico.

A hibridização dos sistemas pode contribuir para reduzir o uso de combustíveis fósseis, reduzir a dependência do transporte de combustível, e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (MACÊDO e PINHO, 2003; BARBOSA *et al*, 2004).

Os impactos sócio-econômicos, em geral, se caracterizam como produtos da implantação dos sistemas híbridos. Na maioria das ocorrências os impactos apresentam características mais benéficas do que prejudiciais, especialmente por se tratarem de sistemas de geração de pequeno porte. Destaca-se também o crescimento populacional rural, visto que combate ao êxodo rural, o incremento de atividades comerciais (bares, armazéns, etc.), a agropecuária, a educação e a telecomunicação, possibilitadas pela energia elétrica (BARBOSA *et al* , 2004).

Quanto aos impactos ambientais, estão basicamente relacionados ao manejo das baterias (há a necessidade de um programa de reciclagem), ao aspecto visual e aos ruídos provenientes da rotação das pás dos aerogeradores, e a ocupação do espaço utilizado para instalação dos equipamentos do sistema híbrido.

Os sistemas híbridos podem representar uma alternativa viável por critérios técnicos, financeiros, sociais e/ou ambientais, inclusive com vantagens em relação à extensão da rede elétrica e/ou sistemas de geração a Diesel (RODRIGUES, 2006).

A pesquisa de sistemas híbridos pode mostrar-se interessante e compensadora em razão que podem oferecer vantagens em relação aos sistemas singelos, principalmente em aplicações que requeiram baixa tolerância a falhas, no qual, a eventual falta ou insuficiência de uma ou mais fontes de energia possa ser compensada outra fonte do sistema (BARBOSA, *et al*, 2004; GARCÍA, 2004).

Os sistemas híbridos podem ser adequados eletrificação de comunidades remotas e/ou isolados do sistema elétrico nacional, em função do alto custo da eletrificação por extensão da rede elétrica de distribuição de lugares de baixa demanda por energia, alto nível de dispersão e difícil acesso dessas áreas, e em geral baixa renda familiar. Tais evidências contribuem para a inviabilidade técnico-

econômica para extensão da rede em localidades assim caracterizadas, especialmente no meio rural (RODRIGUES, 2006).

Políticas públicas podem promover aplicações e o desenvolvimento da tecnologia de sistemas híbridos, visto que a Lei 10.438/2002, que trata da Universalização do Serviço público de energia Elétrica delimita a data da universalização até 2015, e a Resolução 223/2003 (ANEEL), que direciona os Planos de Universalização de Energia Elétrica, priorizam os sistemas híbridos para geração de eletricidade utilizando fontes de energia renovável, como forma importante e viável para o atendimento descentralizado, com foco em localidades isoladas, sem perspectivas de abastecimento convencional (BARBOSA, *et al*, 2004).

2.4 INTRODUÇÃO AO MODELO NUMÉRICO RAMS

*RAMS*¹⁸, *Regional Atmospheric Modeling System*, é um modelo numérico utilizado para várias aplicações meteorológicas, tais como simulações de circulação atmosférica em diferentes escalas, e fenômenos atmosféricos de mesoescala (escala horizontal variando de 2 km a 20 km). Foi desenvolvido na Universidade Estadual do Colorado nos Estados Unidos da América (*Colorado State University, USA*), no início da década de 80 (COTTON *et al*, 2003).

É composto basicamente de três componentes: o modelo propriamente dito, um pacote que permite fazer a assimilação de dados para a inicialização, e o "*Grid Analise Display System*" (GRADS), que permite a interface com software de visualização. Praticamente toda a codificação é feita em linguagem FORTRAN, e apenas algumas rotinas para facilitar entrada e saída de dados e alocação de memória, são escritas em linguagem C (LIMA, 2004).

Tem a capacidade de reproduzir os mais diversos fenômenos atmosféricos em mesoescala (2 km a 40 km), e é bem aceito pelos diversos órgãos de previsão de tempo e pela comunidade científica (COTTON *et al*, 2003; PIELKE *et al*, 1992).

O modelo RAMS foi utilizado nesta dissertação em parceria de processamento nos *clusters*¹⁹ da FUNCEME, que utilizou a versão 6.0. Os dados

¹⁸ *Regional Atmospheric Modeling System*, <http://rams.atmos.colostate.edu/>

¹⁹ **Cluster**, ou **aglomerado de computadores**, é formado por um conjunto de computadores, que utiliza um tipo especial de sistema operacional classificado como sistema distribuído.

atmosféricos considerados foram a radiação solar, a velocidade e a direção do vento. O vento foi considerado através das respectivas componentes zonal (u), meridional (v) e cota vertical (w) da atmosfera.

A representação da dinâmica e termodinâmica do ambiente, em modelagem atmosférica, é realizada através da resolução de um conjunto de equações que visam modelar os processos físicos que ocorrem em determinados fenômenos atmosférico.

As equações básicas do RAMS são da conservação da quantidade de movimento, da conservação da energia, da conservação da razão de mistura e da conservação de massa. Elas são resolvidas pelo método das diferenças finitas, expandidas através de série de Taylor, utilizando diferenças centradas no tempo. A tabela 7 apresenta definições das variáveis utilizadas nas equações do modelo RAMS (COSTA, 2003; TRIPOLI e COTTON, 1982; PIELKE, 1984).

A equação geral da conservação da quantidade de movimento modela o vento conforme as direções latitudinal (positiva de Oeste para Leste), longitudinal (positiva de Sul para Norte) e vertical (positiva para cima), conforme equação 19. A equação apresentando pode ser desmembrada em nas equações parciais de suas componentes vetoriais do vento u , v e w , respectivamente em relação aos eixos x , y e z , respectivamente conforme suas as equações 20, 21 e 22.

Equação de Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\nabla v = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \vec{k} \quad (19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + f_v + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + f_u + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} + \frac{g \theta_v'}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (22)$$

A conservação de energia (Termodinâmica), expressa em termos da conservação da temperatura potencial, é dada pela equação 23.

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \left(\theta \frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) \quad (23)$$

A água apresenta-se na natureza sob várias formas, e pode subdividida em categorias de mistura para facilitar a respectiva análise. Assim, a conservação da razão de mistura da água de determinada categoria é representada conforme a equação 24.

$$\nabla r_n = \frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right) \quad (24)$$

A equação 25 representa da Conservação de Massa.

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R\pi_o}{c_v \rho_o \theta_o} \left(u \frac{\partial \rho_o \theta_o}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_o \theta_o}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_o \theta_o}{\partial z} \right) \quad (25)$$

Tabela 7 - Definições das variáveis utilizadas no modelo RAMS (COSTA, 2003; TRIPOLI e COTTON, 1982; PIELKE, 1984).

∇ - Operador diferencial vetorial

u – componente zonal (leste/oeste) do vento

v – componente meridional (norte/sul) do vento

w – componente vertical do vento

t – Intervalo de tempo

x - Distância longitudinal (Leste-Oeste)

y - Distância latitudinal (Norte-Sul)

z – Altura (vertical)

V – Volume da massa da mistura

f – Parâmetro de *Coriolis*, $2\Omega \sin\Phi$

g – Aceleração da gravidade da Terra

k_m – Coeficiente de viscosidade para quantidade de movimento

k_h – Coeficiente de viscosidade para o calor e umidade

r_n – razão de mistura da água

θ_{il} – Temperatura potencial da água líquida e do gelo

ρ – densidade

p – pressão

π – Função de Exner, $\pi = C_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/C_p}$

C_p - Calor específico do ar a volume constante

p_0 - Escala sinótica da função Exner

p' - Perturbação da função Exner

R – Constante dos gases

2.5 INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE VISUALIZAÇÃO FERRET

O programa *FERRET*²⁰ é basicamente uma ferramenta computacional que pode ser utilizado em várias aplicações científicas e tecnológicas, sendo bastante utilizado pela Meteorologia e Oceanografia. Ele possibilita visualizar os dados atmosféricos gerado pelo *RAMS* e gerar gráficos e tabelas de radiação solar, de velocidade e direção de regiões específicas, objeto desta dissertação.

Foi desenvolvido pela *Thermal Modeling and Analysis Project* (TMAP) e NOAA/PMEL basicamente para analisar os resultados dos seus modelos numéricos oceânicos, e compará-las com os dados observados. É suportado em várias estações de trabalho UNIX, e é de uso compartilhado e gratuito (*shareware*) (FERRET, 2009).

Nesta dissertação, o programa *FERRET* foi utilizado basicamente como ferramenta computacional de operação e visualização dos dados regionais interpolados de radiação solar, velocidade e direção do vento gerados através do programa *RAMS*, instalados e utilizados nos *clusters* da FUNCEME e do laboratório de informática do departamento de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas (MCFA) da Universidade Estadual do Ceará (UECE).

²⁰ Ferramenta de modelagem numérica, <http://ferret.wrc.noaa.gov>

2.6 INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS HOMER

HOMER²¹, *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*, é um programa computacional disponibilizado pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) capaz de auxiliar nas tarefas de configurar, simular, avaliar e otimizar várias opções de projetos de sistemas híbridos para eletrificação de unidades de consumo. Pode combinar tecnologias convencionais e/ou alternativas: geração solar fotovoltaica, eólica, gasolina, Diesel, biocombustíveis, micro-turbinas, pequenas centrais hidroelétricas, termelétricas, células a combustível, banco de baterias, dentre outras. Permite uma análise comparativa básica de diversas alternativas de eletrificação, possibilita estimar impactos da variação de parâmetros de carga, e impacto ambientais diante de possíveis emissões de gases de efeito estufa.

Seu objetivo é basicamente identificar o sistema de menor custo capaz de suprir a demanda de eletricidade de uma determinada unidade consumidora, seja residência urbana ou rural, uma comunidade, uma empresa ou uma indústria (HOMER, 2009).

Esta dissertação utilizou a versão 2.68 do HOMER, a qual encontra-se disponível para avaliação no *site* do NREL.

2.7 ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE PROJETOS

A análise de viabilidade financeira é imprescindível para tomada de decisão sobre alternativas de projetos e/ou investimentos em geral. Nela, os índices econômicos são utilizados para estimar a viabilidade financeira de cada projeto.

Dentre os principais índices é possível destacar o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno do capital (TRC).

Em geral, utiliza-se o modelo de fluxo de caixa na execução da análise de viabilidade financeira, a qual permite avaliar financeiramente um determinado projeto mediante a utilização de certas equações previamente concebidas. (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

²¹ *Hybrid Optimization for Electric Renewable*, ferramenta de auxílio na modelagem computacional de sistemas de pequena potência, <https://analysis.nrel.gov/homer/>

2.7.1 O Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa é a representação gráfica simplificada dos resultados financeiros de um investimento, representados no eixo vertical, ao longo do tempo, representado no eixo horizontal, conforme mostra a figura 29. Nele, o tempo é subdividido em períodos unitários (geralmente meses ou anos), orientados da esquerda para a direita, de tal forma que todos os pontos são considerados como momentos futuros em relação ao ponto de origem. As receitas são consideradas valores positivos, e graficamente representadas como setas direcionadas para cima a partir do eixo horizontal. Os investimentos ou despesas são considerados valores negativos, e graficamente representadas como setas direcionadas para baixo a partir do eixo horizontal.

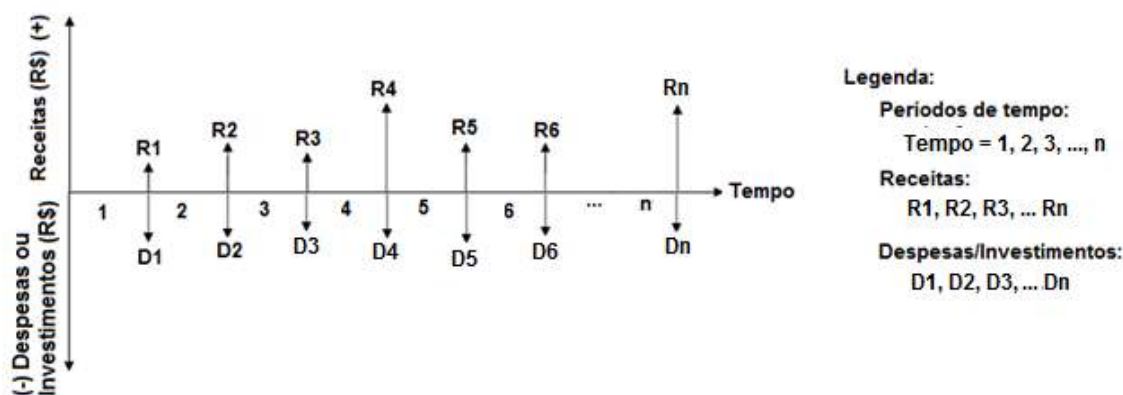


Figura 29 - Representação do fluxo de caixa ao longo tempo
Fonte: Adaptado de MARQUES *et al* (2006) e SOBRINHO (1987).

Para a devida atualização dos valores no tempo ou quantificação do “valor do capital” é utilizada a taxa de juros i . Ela pode ser considerada como sendo o prêmio ou compensação financeira para aquele que empresta o capital, e que espera receber o valor que lhe é devido. Também é utilizada para relacionar o valor futuro VF com o valor presente VP de receitas ou despesas através da equação 26.

$$VF(VP, n) = VP(1+i)^n \quad (26)$$

No caso de haver várias anuidades ao longo do tempo, o cálculo do valor futuro VF deve ser cumulativo, e será dado pela soma das contribuições de cada

anuidade corrigida pela taxa de juros i , conforme equação 27 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$VF(a_i, n) = a_n + a_{n-1}(1+i)^n + \dots + a_1(1+i)^n \quad (27)$$

A utilizando a fórmula da soma dos elementos de uma progressão geométrica de razão q e primeiro termo a_1 , conforme equação 28, resulta a generalização para o cálculo do valor futuro VF, conforme equação 29 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$S_n = a_1 \left(\frac{q^n - 1}{q - 1} \right) \quad (28)$$

$$VF = A \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right) \quad (29)$$

Da combinação das equações 26 e 29 é possível a obtenção do Fator de recuperação do Capital (FRC), conforme equação 30, e do Fator de Valor Presente (FVP), conforme equação 31 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$FRC(i, n) = \frac{A}{VP} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (30)$$

$$FVP(i, n) = \frac{VP}{A} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = FRC(i, n)^{-1} \quad (31)$$

2.7.2 O Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é utilizado para comparar alternativas mutuamente excludentes, tal que todos os benefícios ou custos em seus respectivos instantes no tempo, sejam atualizados para o presente através do fator de valor presente (FVP), conforme equação 32. Assim, a alternativa que oferecer o maior valor presente líquido em relação às demais, neste contexto, a mais interessante (MARQUES *et al*, 2006).

$$VPL = I + C_{O\&M} \cdot FVP(i, n) \quad (32)$$

2.7.3 A Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno do capital é bastante utilizada na análise dos custos e benefícios de projetos. Ela é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, tornando nulo o valor presente líquido do projeto dentro de um período de tempo estipulado.

Considerando a taxa de juros i como sendo a taxa interna de retorno TIR , que representada pela razão entre a anuidade A e o investimento I , conforme representado na equação 33 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$TIR = A/I \quad (33)$$

2.7.4 O Tempo de Retorno do Capital

O tempo de retorno do investimento é basicamente o número de períodos que zera o valor líquido presente do investimento a uma taxa de juros correspondente ao próprio custo do capital. É um dos fatores mais importantes na análise da viabilidade do projeto. Pode ser estimado através do cálculo Tempo de Retorno Simples (não descontado, desconsiderando a taxa de juros), ou através do Tempo de Retorno (descontado, considerando a taxa de juros).

O Tempo de Retorno Simples pode ser usado em projetos com fluxo de caixa que apresentam anuidades com valores constantes ao longo tempo, e calculado através da razão entre o investimento do capital inicial e a anuidade de receita financeira, conforme equação 34 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$n_{\text{simples}} = I/A \quad (34)$$

O Tempo de Retorno Descontado pode ser usado para maior precisão em projetos em função da taxa de juros, e é calculado através da equação 35 (MARQUES *et al*, 2006; SOBRINHO, 1987).

$$n = -\frac{\ln(1 - I/Ai)}{\ln(1+i)} \quad (35)$$

2.7.5 O Custo da Energia Elétrica Produzida

A produção de eletricidade, como todo processo produtivo, demanda custos, que podem estar relacionados com máquinas e equipamentos, com operação e manutenção (O&M), com reposição de peças e/ou equipamentos, dentre outros, conforme a tecnologia utilizada. Basicamente o custo da energia elétrica produzida é a razão do custo total anualizado do sistema de produção de eletricidade e energia elétrica consumida no período de um ano, cuja unidade é o kWh/ano.

O HOMER auxilia no cálculo do Custo da Energia Produzida (COE) através da equação 35, na qual C_{tot_anual} representa o custo total anualizado do sistema [\$/ano], E_{prim_AC} representa a energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente alternada CA [kWh/ano], E_{prim_DC} representa a energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente contínua DC [kWh/ano], e $E_{tot_consumida_rede}$ representa a energia elétrica total consumida da rede [kWh/ano] (HOMER, 2009).

$$COE = \frac{C_{tot_anual}}{E_{prim_AC} + E_{prim_DC} + E_{tot_consumida_rede}} \quad (36)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS NA ANÁLISE DO POTENCIAL DE UM SISTEMA HÍBRIDO CAPAZ DE ELETRIFICAR DE FORMA ALTERNATIVA UMA COMUNIDADE RURAL

Inicialmente, faz-se necessário uma análise comparativa entre as opções convencionais de suprimento energético através de extensão da rede elétrica e de grupo gerador a partir de óleo Diesel, e da eletrificação a partir de fontes alternativas e renováveis locais disponíveis na região de Pentecoste-CE: potenciais solar, eólico e do biodiesel B2.

Os dados técnicos de painéis fotovoltaicos, aerogeradores, banco de baterias para armazenamento de eletricidade e conversores também são buscados no mercado local. No caso dos grupos geradores utilizados nas simulações a partir de biodiesel B2 foram considerados os padrões no mercado local com a substituição do combustível Diesel pelo biodiesel B2.

O dimensionamento do sistema híbrido de geração alternativa de eletricidade foi feito para que este atenda e satisfaça plenamente, com qualidade, continuidade e segurança, a demanda energética consumidora da amostra. Para isso, faz-se necessário o conhecimento da demanda de eletricidade da amostra em estudo, e disponibilidade de potenciais de radiação solar e eólico da região da amostra.

As estimativas de potenciais de radiação solar e eólico foram feitas mediante modelagem numérica através do RAMS a partir de dados de entrada de radiação e velocidade dos ventos disponíveis e coletados nas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da FUNCEME (2009), conforme figura 30, e dados de re-análise do NCEP/NCAR (2009).

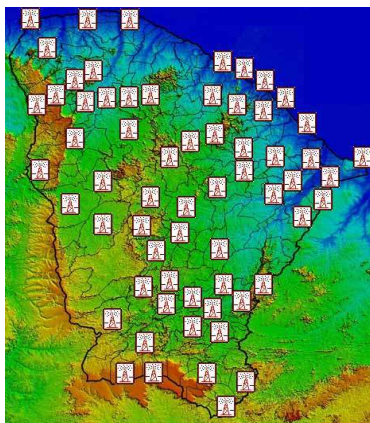


Figura 30 – Representação das Plataformas de Coleta de Dados da FUNCEME no Ceará
Fonte: Adaptada de FUNCEME (2009)

Os dados de radiação solar e velocidade de vento foram estimados com o auxílio do programa de modelagem numérica RAMS, através da especificação das coordenadas geográficas da região da amostra, definida pelas latitudes inicial e final e longitudes inicial e final que abrange a região de Pentecoste no Estado do Ceará.

O programa FERRET auxiliou na visualização dos valores de dados de radiação solar e de velocidade do vento, estimados pelo RAMS.

O programa HOMER auxiliou na especificação, dimensionamento e simulação do sistema híbrido capaz de satisfazer adequadamente à demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá, do município cearense de Pentecoste.

A metodologia aplicada para eletrificação alternativa através de um sistema híbrido combinando geração fotovoltaica, eólica e biodiesel B2 consiste basicamente nas seguintes etapas:

1) Identificação, pesquisa de campo e análise da demanda energética da comunidade rural a ser caracterizada no estudo de caso;

2) Análise dos potenciais eólicos e de radiação solar da região geográfica da comunidade rural a ser pesquisada, através da utilização das ferramentas de modelagem numérica RAMS, e de visualização computacional interativa FERRET;

3) Análise da viabilidade técnica e financeira de sistemas híbridos para eletrificação alternativa do meio rural de Pentecoste-CE;

4) Com o auxílio da simulação computacional do HOMER, proceder simulações, análises comparativas de configurações de sistemas híbridos e respectivos custos na geração de energia elétrica capaz de fornecer eletricidade a comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste;

5) Seleção da melhor opção de configuração de sistema híbrido, capaz de atender, com qualidade e menor custo possível, à demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste.

3.1 ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DA CURVA DE POTÊNCIA ELÉTRICA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ, PENTECOSTE-CE

A localização do consumidor é precedida da realização do mapeamento da região. Esta etapa pode ser dividida na especificação geográfica da amostra a ser estudada, e na verificação da distância entre o sistema elétrico existente e a localização geográfica da amostra escolhida.

O mapeamento da região de estudo, bem como a definição geográfica da amostra, foi feita através da estratégia cartográfica convencional no mapa do Estado do Ceará, além de registros do relatório de pesquisa e avaliação da então estatal COELCE. Tais valores podem ser melhorados mediante uso de pares de coordenadas coletadas na pesquisa de campo com o auxílio de equipamentos do tipo GPS - *Global Positioning System*. Diante da localização do sistema elétrico existente, estas informações visam permitir análise comparativa entre a eletrificação via extensão de rede elétrica e a eletrificação através de sistemas híbridos.

O município cearense de Pentecoste encontra-se geograficamente localizado no quadrante formado pelas latitudes 3° 10' Sul e 4° 5' Sul, e as longitudes 39° 26' Oeste e 38° 56' Oeste, conforme mostrado na figura 31. Sua sede municipal dista aproximadamente 89 km de Fortaleza (IPRECE, 2007). Apresenta uma altitude de 45 metros acima do nível do mar, um clima predominantemente semi-árido, uma área geográfica de 1.378,295 km², uma população de 35.166 habitantes e densidade demográfica de 23,8 hab./km² (IBGE, 2009). Os principais indicadores são o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH médio) de 0,635 (PNUD, 2009), Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 81.481.000, e um PIB *per capita* de R\$ 2.483,00 (IBGE, 2009).

A figura 32 representa a rede elétrica de distribuição do Estado do Ceará (SEINFRA-CE, 2010)

A comunidade rural de Irapuá, objeto do destes estudo de caso, é referenciada na cor vermelha na figura 33, encontra-se distante cerca de 21 km da sede municipal de Pentecoste (CRAVEIRO, 1995), e a 840 metros distante da rede elétrica de distribuição mais próxima, Conforme mostrado na figura 32 (SEINFRA-CE, 2010).

A localização da Escola Agrícola da UFC em Pentecoste e a possibilidade de análise dos sistemas fotovoltaicos de iluminação e bombeamento d'água instalados em Irapuá (Pentecoste-CE) através da parceria da então estatal COELCE e empresa alemã GTZ foram os principais fatores decisivos para escolha desta comunidade rural como estudo de caso desta dissertação.

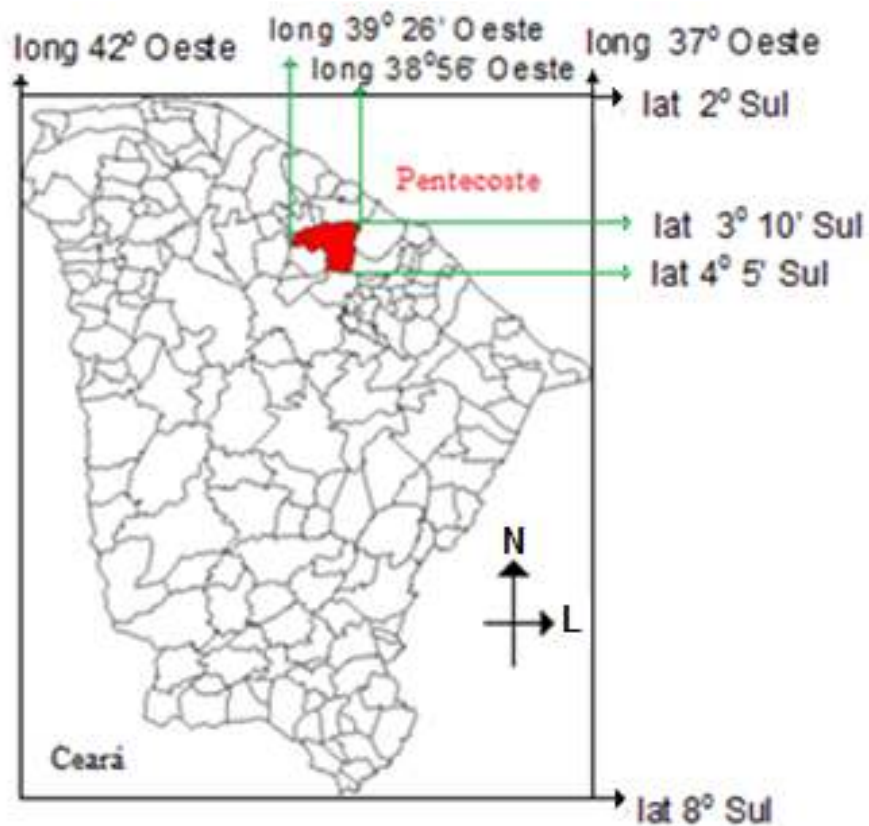


Figura 31 - Caracterização geográfica da região de Pentecoste-CE

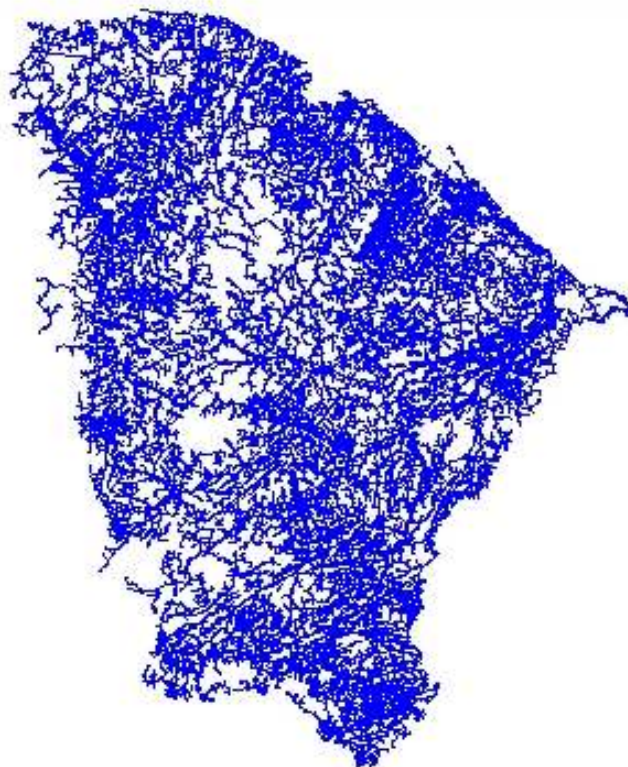


Figura 32 - Caracterização da rede de média tensão (em azul) no Ceará (SEINFRA, 2010)

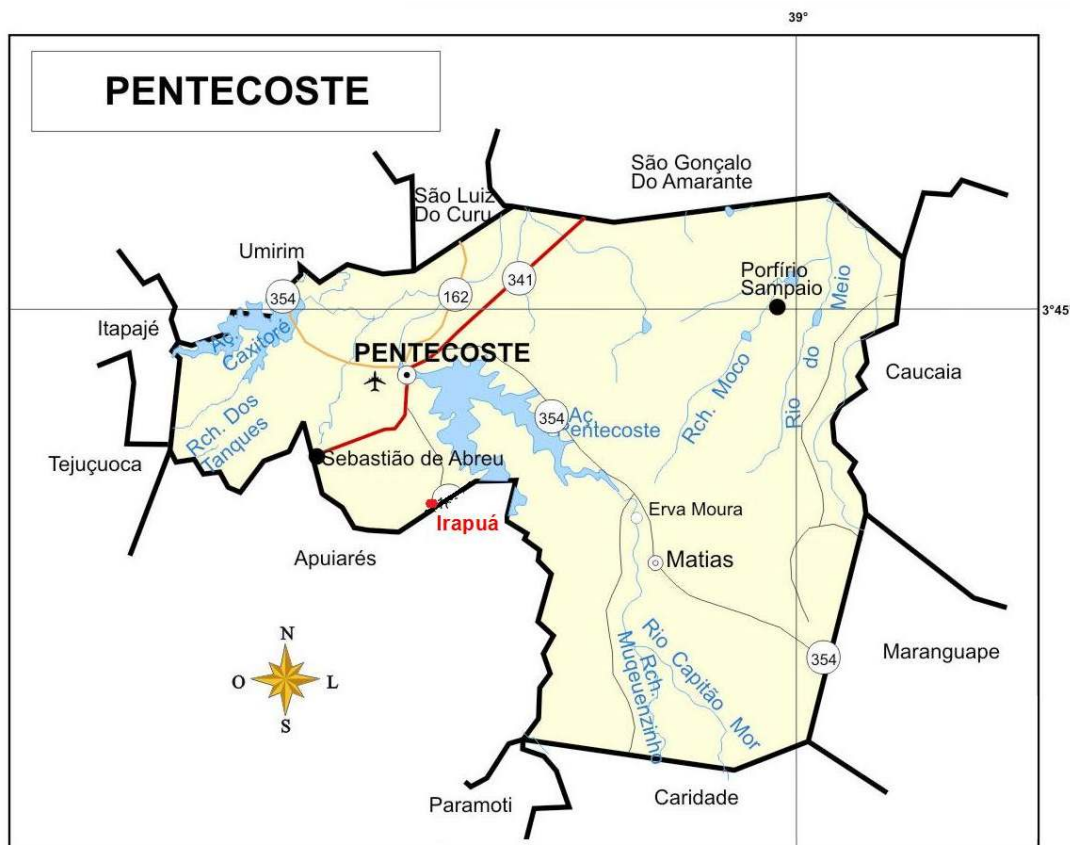


Figura 33- Caracterização geográfica da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE
Fonte: IPECE (2010)

A identificação do perfil de consumo requer o reconhecimento da curva de carga diária da comunidade. Esta pode ser encontrada através de mensuração do consumo de eletricidade junto à subestação da concessionária de energia elétrica local, ou através de pesquisa de campo para levantamento da potência instalada (iluminação, tomadas de uso geral e específico) e respectivos períodos de utilização de eletricidade, para cada unidade de consumo da amostra, que somadas permitirá estimar o consumo comunitário ao longo do dia, e posteriormente traçar a curva de carga diária da referida comunidade.

Considerando que a Concessionária local não dispõe de subestação na localidade de Irapuá, foi realizada a pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá.

Com o objetivo de caracterizar a curva de potência diária da comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-CE, foi realizada uma pesquisa de campo, na qual foram visitadas 17 unidades de consumo da respectiva comunidade, das quais todas foram caracterizadas como basicamente residências rurais. A referida comunidade

dispõe de um total de 56 residências rurais cadastradas junto à Associação de Moradores da Comunidade Rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste. Portanto, a especificação da demanda de eletricidade foi estimada em função a curva de potência média diária a partir de uma amostra com representatividade estatística de 30,35% em relação ao total de residências da comunidade rural de Irapuá.

A estimativa da curva de potência média diária da comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-CE, foi introduzida como dados de entrada no programa HOMER, para caracterização da demanda de eletricidade da respectiva comunidade rural.

3.2 ANÁLISE DOS POTENCIAIS SOLAR, EÓLICO E BIODIESEL (B2) DA REGIÃO DE PENTECOSTE-CE

A análise do potencial de aplicação de sistemas híbridos como alternativa para eletrificação do meio rural de Pentecoste, no Estado do Ceará, é feita após estimar os potenciais de radiação solar, eólico e biodiesel B2 da região geográfica de Irapuá Do município cearense de Pentecoste.

Os potenciais de radiação solar e eólico do município cearense de Pentecoste foram estimados mediante através do programa de modelagem numérica RAMS e visualizados e quantificados graficamente através do programa FERRET.

O potencial de produção de biodiesel B2 para do município cearense de Pentecoste foi elaborado e analisado mediante capacidade de produção de oleaginosas como matéria-prima, insumos utilizados e custo final do litro de biodiesel.

3.2.1 ESTIMATIVA DO POTENCIAL SOLAR DE PENTECOSTE

A estimativa do potencial solar do município cearense de Pentecoste foi feita a partir de uma base de dados interpolados basicamente de radiação solar, criada através do programa RAMS, instalado na FUNCEME e no laboratório de informática do curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará. Tais dados foram coletados basicamente a partir de

plataformas de dados (PCDs) da FUNCEME, de dados de re-análise do NCEP/NCAR (MENEZES NETO, 2007).

A partir da referida base de dados interpolados de radiação solar do município cearense de Pentecoste, foi feita a visualização e uma representação quantitativa do respectivo potencial solar por unidade área (W/m^2) através do auxílio computacional da ferramenta do programa FERRET.

Através da aplicação do procedimento de modelagem numérica com o auxílio do RAMS e de visualização dos respectivos dados através do FERRET, foi possível encontrar a estimativa de potencial de radiação solar médio da região de Pentecoste, conforme mostrado na figura 34. Na mesma, radiação solar estimada apresenta valor máximo de 6,31 kWh/m²/dia, no mês de outubro, valor mínimo de 4,65 kWh/m²/dia, no mês de abril, e uma média anual de 5,205 kWh/m²/dia. O potencial solar estimado para os meses de janeiro, abril e setembro, com os respectivos perfis, são mostrados para melhor visualização e contextualização dos dados apresentados respectivamente nas figuras 54, 56 e 58 do Anexo 3.

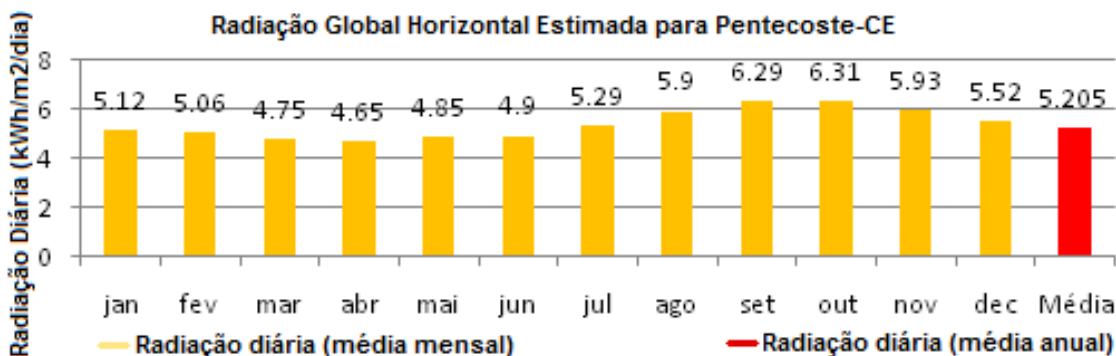


Figura 34 - Estimativa do Potencial Solar de Pentecoste-CE, em 15/01/2010.

Os dados do potencial solar da região do município cearense de Pentecoste foram calculados através do RAMS ao longo do ano, e introduzidos no programa HOMER como dados de entrada de especificação do recurso. E com o auxílio computacional do HOMER foram feitas simulações para possíveis configurações de sistemas híbridos, nas quais foram priorizadas as respectivas viabilidades financeiras.

3.2.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO DE PENTECOSTE

A estimativa do potencial eólico da região de Pentecoste-CE foi feita a partir de uma base de dados interpolados basicamente de velocidade de vento (m/s), criada através do programa RAMS, instalado na FUNCEME e no laboratório de informática do curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará. Tais dados foram coletados basicamente a partir de plataformas de dados (PCDs) da FUNCEME, de dados de re-análise do NCEP/NCAR (MENEZES NETO, 2007).

Através da aplicação do programa de modelagem numérica com o auxílio do RAMS e de visualização dos respectivos dados através do programa FERRET, foi possível encontrar a estimativas de velocidade do vento (m/s) a 10 metros acima do solo da região de Pentecoste-CE, definida pelo quadrante latitude ($3^{\circ} 10'$ Sul - $4^{\circ} 5'$ Sul) e longitude ($39^{\circ} 26'$ Oeste - $38^{\circ} 56'$ Oeste).

A partir da base de dados interpolados, gerados pelo *RAMS*, de velocidade de vento (m/s) da região de Pentecoste-Ce foi feita a visualização e uma representação da densidade de potência, quantificação do respectivo potencial por unidade área através do auxílio computacional da ferramenta do programa FERRET.

Na região de Pentecoste, a velocidade estimada do vento apresenta um valor máximo de 6,62 m/s no mês de agosto, um valor mínimo de 2,81 m/s no mês de fevereiro, e um valor médio anual de 4,84 m/s, conforme mostrado na figura 35. O potencial eólico estimado para os meses de janeiro, fevereiro e agosto, com os respectivos perfis, são mostrados para melhor visualização e contextualização dos dados apresentados respectivamente nas figuras 49, 51 e 53 do Anexo 2.

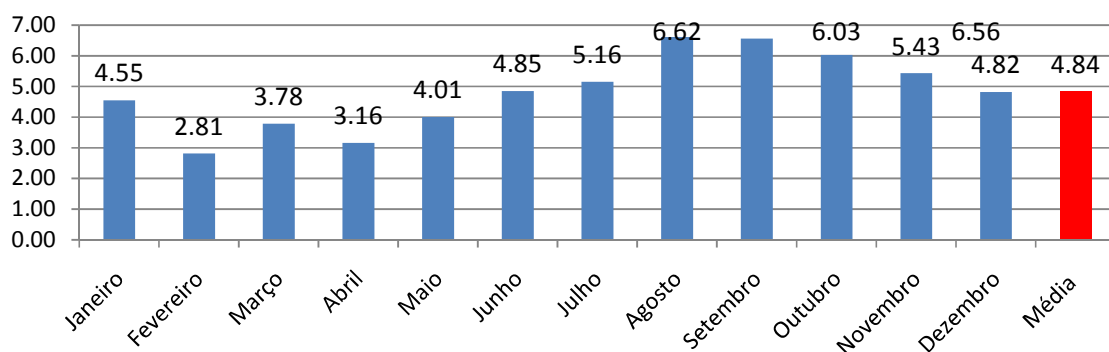


Figura 35 – Representatividade anual da velocidade do vento (m/s) a 10 m acima do nível do solo da região de Pentecoste-Ce.

3.2.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIODIESEL DE PENTECOSTE

As características das principais oleaginosas brasileiras e suas respectivas características são mostradas na tabela 8. A mamona apresenta o maior teor percentual de óleo, mas o dendê apresenta o maior índice de produção de óleo em quilograma por hectare ao ano, favorecendo melhor a produção de biodiesel (SAUER, 2007).

Tabela 8 - Principais Características das Oleaginosas Brasileiras.

Oleaginosa	Teor de óleo (%)	Produtividade (kg/ha.ano)	Produção de óleo (kg/ha.ano)
Mamona	50	1500	750
Girassol	42	1600	672
Amendoim	39	1800	702
Gergelim	39	1000	390
Canola	38	1800	684
Dendê	20	10000	2000
Soja	18	2200	396
Algodão	15	1800	270
Babaçu	6	15000	900

Fonte: Adaptado de SAUER (2007).

A análise comparativa dos custos de produção de biodiesel a partir de mamona, dendê, óleo reciclado em relação ao Diesel e biodiesel B2 mostra que a produção de biodiesel de mamona e/ou de dendê ainda não é financeiramente inviável, em relação ao Diesel refinado e biodiesel B2, conforme tabela 9.

Tabela 9 - A análise comparativa dos custos de produção de biodiesel

Aplicação de biodiesel e Diesel	Disponibilidade (meses)	Custo (R\$/litro)
Óleo reciclado + metanol	Imediato	1,74
Óleo reciclado + etanol	Imediato	1,76
Mamona + metanol	18	3,68
Mamona + etanol	18	3,70
Dendê + metanol	84	3,97
Dendê + etanol	84	3,99
Diesel refinado	Imediato	2,17
Biodiesel B2	Imediato	2,16

Fonte: Adaptado de DOU (2009) e RODRIGUES (2006)

O cultivo de mamona para produção de biodiesel pode trazer benefícios sócio-econômicos e ambientais para a região de Pentecoste (MENESES, 2005).

A região rural de Pentecoste é naturalmente favorecida para produção de mamona, dentre outras oleaginosas. Contudo, conforme mostrado na tabela 12, a aquisição de biodiesel B2 de concessionárias de combustíveis apresenta-se (como opção) financeiramente mais adequada, em relação à aplicação de oleaginosas para produção de biodiesel, em razão da logística, da tecnologia e políticas atuais.

Contudo, uma análise mais aprofundada do potencial de produção do biodiesel fica como proposta para pesquisas futuras.

3.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA DO SISTEMA HÍBRIDO

Os custos tecnológicos e recursos utilizados nas simulações para suprimento de eletricidade à comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste, em 15/01/2010. Dentre os principais dados apresentam-se a relação de equipamentos utilizados nas simulações, com respectivos custos, custo dos combustíveis utilizados nas simulações, tarifas de energia elétrica praticadas pela concessionária local, custos médios da extensão de rede de distribuição elétrica praticadas no Programa Luz Para Todos.

A tabela 10 apresenta a relação de equipamentos utilizados nas simulações, com respectivos custos e potência nominal.

Tabela 10 - Sumário de características técnico-financeiras dos recursos tecnológicos utilizado nas simulações

Recursos utilizados nas simulações	Potência nominal (kW)	Custo de aquisição (R\$)	Custo de Reposição (R\$)	Custo de O&M (R\$/hora)	Ciclo de vida médio (anos)
Kyocera 130 Wp	0,13	1.833	1.833	18	25
Aerogerador ENERSUD 0,35 kW	0,35	4.112	4.112	82	25
Aerogerador ENERSUD 1 kW	1	6.815	6.815	136	25
Aerogerador Wind Power SKW3,7	1,8	21.480	21.480	430	20
Aerogerador ENERSUD 6 kW	6	34.010	34.010	680	20
Aerogerador Furlander F30	30	223.750	223.750	4.475	20
Aerogerador Furlander F100	100	745.833	745.833	14.917	20
Conversor/inversor	1,5	3.580	3.580	358	15
Banco de baterias (12 V, 170Ah)	1,7	909	909	6	4
Banco de baterias (12 V, 150Ah)	1,5	802	802	5	4
Banco de baterias (12 V, 110Ah)	1,1	600	600	4	4
Grupo Gerador de 15kW a óleo B2	15	5.370	4.296	0,003	15
Grupo Gerador de 20 kW a óleo B2	20	7.160	5.728	0,004	15

Fonte: Adaptado de Southwest Windpower (2009), DEMIROREN e YILMAZ (2009), SANTOS *et al* (2008), EOLICARIO (2009), SOLAR (2009).

O sumário de custo dos combustíveis Diesel e Biodiesel (B2) utilizados nas simulações desta dissertação é mostrado na tabela 11.

Tabela 11 - Sumário de custos dos combustíveis utilizados nas simulações

Combustível	R\$ / litro
Diesel	2,17
Biodiesel (B2)	2,16

Fonte: Adaptado de DOU (2009).

Os custos da extensão de rede elétrica de distribuição praticadas no Programa Luz Para Todos (PLPT) são basicamente apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Sumário de custos da extensão de rede de distribuição elétrica praticadas pela concessionária local.

Custo e extensão por km de rede (R\$/km)	Custo de O&M por km de rede (R\$/km)	Tarifa média de fornecimento (R\$/kWh)
22.645,98	452,92	0,37962

Fonte: Adaptado de ANEEL (2010), COELCE (2010), BETIOL JUNIOR (2006).

3.4 ESPECIFICAÇÃO, ANÁLISE, SIMULAÇÃO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA HÍBRIDO PARA ELETRIFICAÇÃO ALTERNATIVA DE IRAPUÁ

Esta seção apresenta a possibilidade de eletrificação por grupos de diferentes faixas de consumo de eletricidade dentro da comunidade rural de Irapuá do município de Pentecoste, como também a opção de eletrificação integral da mesma.

Através da curva de potência diária foi calculada a potência média diária e verificada a potência de pico média, a partir das quais, através das relações básicas de eletrotécnica, foram dimensionados o módulo da potência (proporcional ao produto da tensão pela corrente elétrica, a quantidade e a potência das turbinas eólicas, do banco de baterias, da quantidade e potência dos conversores de potência e do grupo gerador a biodiesel B2.

A potência média do(s) aerogerador(es), para suprir eletricamente a demanda da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, foi considerada igual ou superior à potência média de pico estimada para a demanda da referida comunidade.

Assim como no caso do suprimento elétrico por aerogeradores, a potência média do(s) painéis fotovoltaicos foi considerada igual ou superior à potência média de pico estimada para demanda da comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-CE.

O suprimento de eletricidade através de grupo gerador a biodiesel B2 está previsto para a eventual insuficiência de energia eólica e/ou eólica. Considerando que as unidades de consumo de eletricidade na comunidade rural de Irapuá são basicamente residências rurais, a determinação da potência média gerada a partir de grupo gerador a biodiesel B2 foi estimada para atender a partir da potência média diária da comunidade rural de Irapuá, que foi estimada através de análise estatística da amostra obtida na pesquisa de campo junto a respectiva comunidade.

O conjunto de inversores de tensão²² foi determinado a partir da razão entre a potência de pico estimada para demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá e a potência nominal unitária do inversor padrão utilizado.

O banco de baterias foi estimado a partir da razão entre a potência de pico diária, estimada para demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá, e a potência nominal unitária da bateria utilizada. E a potência nominal unitária da bateria é estimada em função do produto das respectivas tensão e corrente.

Após a estimação dos componentes do sistema híbrido foi feita simulações de configuração e combinação das várias opções com os respectivos componentes do sistema híbrido, através do auxílio computacional da ferramenta HOMER.

A partir dos resultados obtidos na etapa anterior foi feita a seleção da melhor opção priorizando os custos de capital inicial, de manutenção e operação, da energia gerada, e atentando para as eventuais emissões de gases de efeito estufa do sistema híbrido capaz de atender, de forma alternativa e adequada, o suprimento de eletricidade da comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-CE, a partir da respectiva demanda elétrica e da disponibilidade de potenciais solar, eólico e biodiesel B2.

²² São conversores estáticos com a função de controlar o fluxo de energia elétrica entre uma fonte de tensão de corrente contínua e uma carga em corrente alternada (LANDER, 1988)

4 RESULTADOS

Com o desenvolvimento desta dissertação foram verificados os seguintes resultados descritos a seguir.

Através da pesquisa de campo, concluída em 15 de janeiro de 2010, foi possível verificar que, em relação ao relatório técnico de CRAVEIRO (1995), ocorreu basicamente um crescimento do número de residências de 42 para 56, e também uma evolução do perfil de consumo de energia elétrica. Segundo BARBOSA (1995) e CRAVEIRO (1995), o perfil de consumo de energia elétrica da comunidade de Irapuá em Pentecoste-CE era, no relatório técnico da COELCE, basicamente padronizado de até 30 kWh/mês, e evoluiu para faixas de consumo de até 350 kWh/mês. Também foi possível observar uma diversificação do perfil sócio-econômico dentre os membros da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE.

A concessionária de energia local, COELCE, atende a comunidade rural de Irapuá em Pentecoste através de extensão de rede elétrica de distribuição, mas como não dispõe de subestação na referida localidade, não há como mensurar o consumo de eletricidade da comunidade rural de Irapuá. Sendo assim, a pesquisa de campo realizada para caracterizar a demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá, que foi estimada por amostragem de 30,36 % do total das unidades de consumo da referida comunidade.

O foi verificado a existência de mais duas unidades de consumo rural do tipo residencial-comercial (bar) na comunidade de Irapuá, sem borracharia. Isto pode significar que o percentual da faixa de consumo do grupo 250 pode estar superestimado, podendo variar de 1,79% a 5,88. Com isso, o percentual da faixa de consumo do grupo 220 pode estar subestimado, podendo varia de 5,88% a 9,98%.

Contudo, considerando que a demanda elétrica é sempre crescente, foram considerados os valores de demanda mais significativos para promoção do desenvolvimento sócio-econômico.

Conforme apresentado na tabela 8, foi verificado na pesquisa de campo que a demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá é composta de várias faixas de consumo, que para efeito de análise estatística e adequação no suprimento de eletricidade da comunidade rural como um todo através do sistema híbrido, tais

faixas de consumo foram divididas em grupos de amostra com faixas de consumo parecidas entre si e diferentes entre os demais grupos.

As faixas de consumo de eletricidade identificadas através da amostra da comunidade rural de Irapuá são de até 30 kWh/mês, de 30 até 90 kWh/mês, de 90 até 120 kWh/mês, de 120 até 150 kWh/mês, de 150 até 180 kWh/mês, de 180 até 220 kWh/mês e de 220 até 350 kWh/mês. Tais faixas de consumo caracterizam respectivamente os grupos G30 (com 17,65% de ocorrência na amostragem), G90 (com 5,88% de ocorrência na amostragem), G120 (com 29,41% de ocorrência na amostragem), G150 (com 17,65% de ocorrência na amostragem), G180 (com 17,65% de ocorrência na amostragem), G220 (com 5,88% de ocorrência na amostragem) e G350 (com 5,88% de ocorrência na amostragem), conforme mostrado na tabela 13.

Tabela 13 - Especificação dos grupos e respectivas faixas de consumo de eletricidade na comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-Ce, em 15/01/2010.

Grupos de faixa de consumo	Faixas de Consumo em kWh/mês	Unidades de consumo verificadas na amostragem	Percentuais observados na Comunidade (%)
G30	de 0 a 30 kWh/mês	3	17,65
G50	de 30 a 50 kWh/mês	0	0,00
G90	de 50 a 90 kWh/mês	1	5,88
G120	de 90 a 120 kWh/mês	5	29,41
G150	de 120 a 150 kWh/mês	3	17,65
G180	de 150 a 180 kWh/mês	3	17,65
G220	de 180 a 220 kWh/mês	1	5,88
G350	de 220 a 350 kWh/mês	1	5,88
Amostra	Total	17	30,36
População	Total	56*	100,00

* Total de residências rurais cadastradas junto à Associação de Moradores da Comunidade Rural de Irapuá, Pentecoste-CE.

A análise comparativa da pesquisa de campo e do relatório técnico de CRAVEIRO (1995) evidencia um crescimento tanto quantitativo e qualitativo de consumo na comunidade rural de Irapuá. Segundo CRAVEIRO (1995) o volume de consumo era média de 30 kWh/mês, de forma praticamente padronizada. Atualmente há faixas de consumo que variam de 30 a 350 kWh/mês.

Vale ressaltar que a unidade de consumo caracterizada na amostra com faixa de consumo em torno de 350 kWh/mês é simultaneamente uma residência rural e um estabelecimento comercial rural (um barzinho com dois freezers e também uma borracharia com um compressor e uma máquina de remendar pneus).

A tabela 14 apresenta a potência nominal dos equipamentos elétricos instalados junto à comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, em 15/01/2010.

Tabela 14 - Potência nominal dos equipamentos elétricos instalados junto a comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, em 15/01/2010.

Equipamentos elétricos verificados	Potência nominal unitária (W)
Iluminação com lâmpada incandescente	60 - 100
Iluminação com lâmpada fluorescente	20 - 40
Iluminação com lâmpada eletrônica	15 -22
TV em cores 14"	60
Geladeira ou Freezer	130
Rádio ou micro-sistema de som	100
Liquidificador	300
Ferro de engomar	1000
Ventilador	100
DVD ou CD player	12
Computador	300
Máquina de lavar roupa	500
Compressor	150
Máquina de remendar pneu	165

4.1 ESPECIFICAÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA MÉDIA DIÁRIA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ, PENTECOSTE-CE

Considerando que a concessionária de eletricidade local abastece, mas não dispõe de subestação na localidade de Irapuá para medição, monitoramento e controle diretos da energia total consumida pela comunidade rural de Irapuá, apenas de medidores para cada unidade de consumo, que para coleta integral prolongaria o tempo desta dissertação, como foi dito anteriormente, foi utilizado análise estatística básica para os dados coletados na amostragem da pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá. Na amostragem foram identificadas várias faixas de consumo de eletricidade, com respectivas demandas de potência média em intervalos de tempo de uma hora, respectivamente caracterizadas nas curvas de

potência demandada ou curvas de carga²³ das faixas de consumo G30, G90, G120, G150, G180, G220 e G350, identificadas junto à comunidade rural de Irapuá, conforme curvas de potência respectivamente mostradas nas figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42.

Através de análise de dados e informações coletados na pesquisa de campo, referentes à disponibilidade de equipamentos eletro-eletrônicos e respectivos potência nominal e períodos de utilização ao longo do dia, foi feita a caracterização da curva de potência das faixas de consumo identificadas na amostragem. E por análise estatística básica foi estimada a curva de potência da comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-CE.

O grupo G30 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 17,65%, uma potência diária média²⁴ demandada de 0,72 kWh/dia, uma potência nominal média²⁵ de 0,03 kW, uma potência de pico²⁶ média de 0,08 kW, um fator de carga²⁷ de 0,37, e uma potência mensal²⁸ média de 21,45 kWh/mês, conforme mostrado na figura 36 e tabela 15.

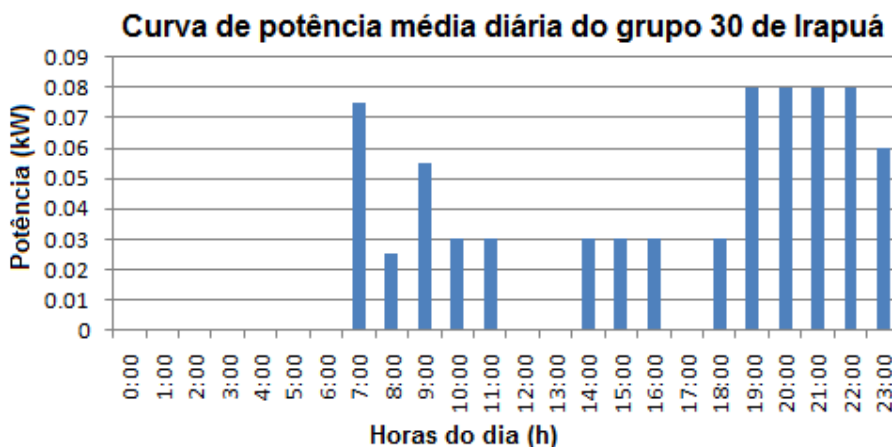


Figura 36 – Curva de potência típica média do grupo G30, obtida na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G90 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 5,88%, uma potência diária média demandada de 2,92 kWh/dia, uma

²³ Curvas que representam as potências médias demandadas em intervalos de tempo, geralmente de uma hora, de uma unidade consumidora de eletricidade (MARQUES *et al*, 2006).

²⁴ Este valor é obtido através do somatório das potências ao longo do dia.

²⁵ Obtido através da média diária da potência diária.

²⁶ Valor máximo da potência ao longo do dia.

²⁷ Razão entre a potência media consumida e a potência máxima requerida (MARQUES *et al*, 2006)

²⁸ Valor obtido das potências diárias ao longo do mês.

potência nominal média de 0,12 kW, uma potência de pico média de 1,11 kW, fator de carga de 0,11, e uma potência mensal média de 87,6 kWh/mês, conforme mostrado na figura 37 e tabela 15.

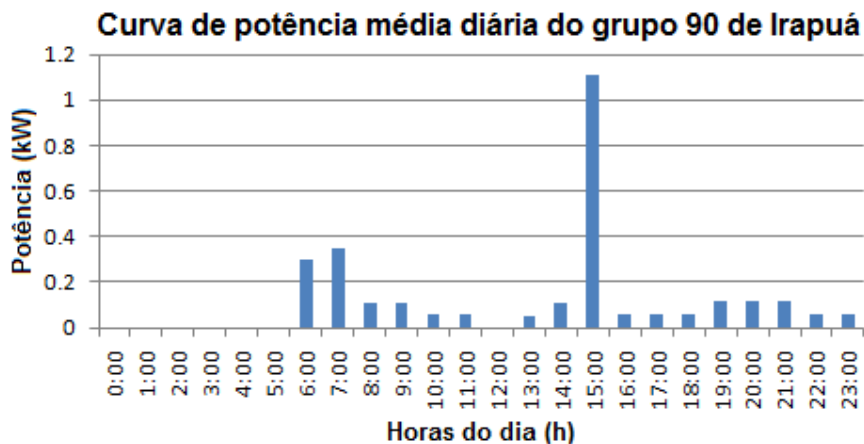


Figura 37 - Curva de potência típica média do grupo G90 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G120 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 29,41%, uma potência diária média demandada de 3,92 kWh/dia, uma potência nominal média de 0,16 kW, uma potência de pico média de 0,25 kW, fator de carga de 0,65, e uma potência mensal média de 117,6 kWh/mês, conforme mostrado na figura 38 e tabela 15.

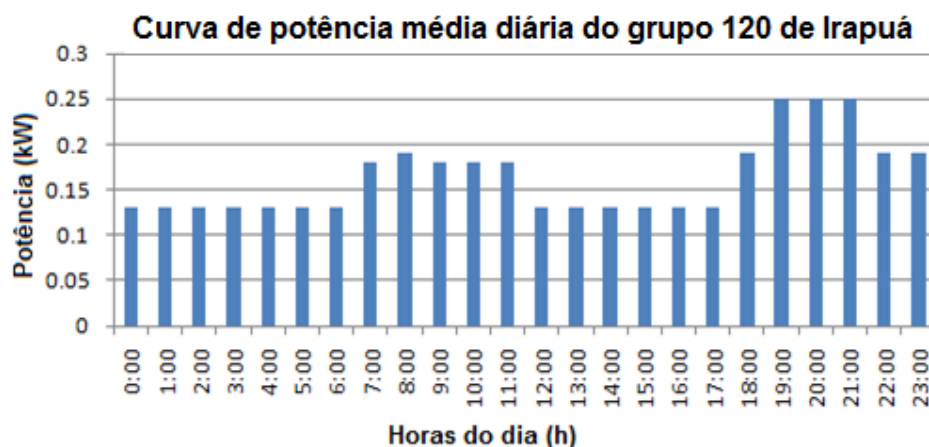


Figura 38 - Curva de potência típica média do grupo G120 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G150 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 17,65%, uma potência diária média demandada de 4,95 kWh/dia, uma potência nominal média de 0,21 kW, uma potência de pico média de 0,685 kW, fator de carga de 0,30, e uma potência mensal média de 148,5 kWh/mês, conforme mostrado na figura 39 e tabela 15.

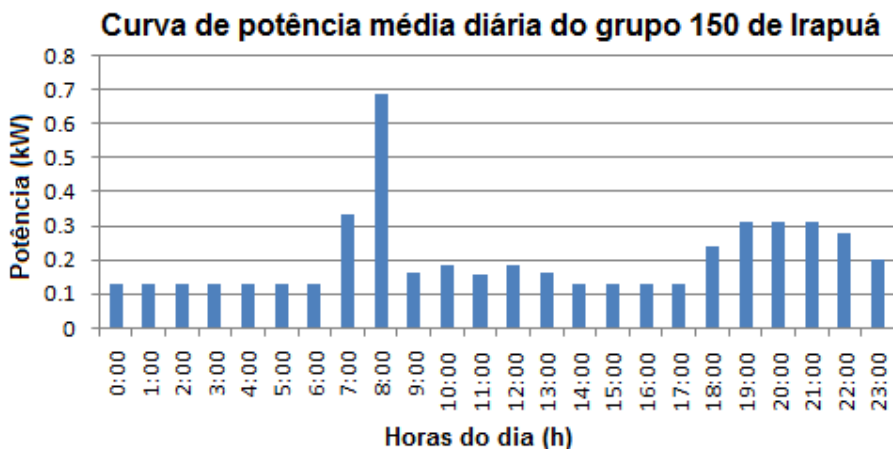


Figura 39 - Curva de potência típica média do grupo G150 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G180 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 17,65%, uma potência diária média demandada de 6,18 kWh/dia, uma potência nominal média de 0,26 kW, uma potência de pico média de 1,13 kW, fator de carga de 0,23, e uma potência mensal média de 185,4 kWh/mês, conforme mostrado na figura 40 e tabela 15.



Figura 40 - Curva de potência típica média do grupo G180 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G220 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 5,88%, uma potência diária média demandada de 7,36 kWh/dia, uma potência nominal média de 0,31 kW, uma potência de pico média de 1,13 kW, fator de carga de 0,27, e uma potência mensal média de 220,8 kWh/mês, conforme mostrado na figura 41 e tabela 15.



Figura 41 - Curva de potência típica média do grupo G220 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

O grupo G350 caracteriza-se por apresentar uma representatividade amostral de 5,88%, sendo praticamente única na comunidade, uma potência diária média demandada de 12,1 kWh/dia, uma potência nominal média de 0,50 kW, uma potência de pico média de 1,45 kW, fator de carga de 0,35, e uma potência mensal média de 363 kWh/mês, conforme mostrado na figura 42 e tabela 15.



Figura 42 - Curva de potência típica média do grupo G350 obtida na pesquisa de junto à comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/02/2010.

Através do somatório das curvas de potência dos grupos de faixas de consumo G30, G90, G120, G150, G180, G220 e G350, identificadas na pesquisa de campo junto à comunidade rural de Irapuá, conforme mostrado nas figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42, respectivamente multiplicadas pelos percentuais de representatividade amostral (conforme tabela 8) em relação ao total de unidades residenciais cadastradas junto à Associação de Moradores da Comunidade Rural de Irapuá, foi obtida a curva de potência diária estimada para a comunidade rural de Irapuá, caracterizada por uma potência diária média demandada de 258,2 kWh/dia, uma potência nominal média de 10,8 kW, uma potência de pico média de 28 kW, fator de carga de 0,38, e uma potência mensal média de 7.740 kWh/mês, conforme figura 43 e tabela 15.



Figura 43 - Curva de potência típica média da comunidade rural de Irapuá (Pentecoste-CE) estimada em função das faixas de consumo verificadas e respectivos percentuais obtidos na pesquisa de campo junto à referida comunidade, em 15/02/2010.

Tabela 15 – Características técnicas estimadas para tarifação da energia elétrica para a comunidade rural de Irapuá, em Pentecoste-Ce.

Características técnicas estimadas	G30	G90	G120	G150	G180	G220	G350	Comunidade de Irapuá
Potência diária média (kWh/dia)	0,72	2,92	3,92	4,95	6,18	7,36	12,1	258,2
Potência média (kW)	0,03	0,12	0,16	0,21	0,26	0,31	0,50	10,8
Potência de pico média (kW)	0,08	1,11	0,25	0,685	1,13	1,13	1,45	28
Fator de carga médio	0,37	0,11	0,65	0,30	0,23	0,27	0,35	0,38
Potência média mensal estimada (kWh/mês)	21,45	87,6	117,6	148,5	185,4	220,8	363,0	7.740,0

4.2 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO PARA ELETRIFICAÇÃO ALTERNATIVA DA COMUNIDADE RURAL DE IRAPUÁ.

Para um suprimento adequado de eletricidade da demanda da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, a potência média do(s) aerogerador(es), deverá ser igual ou superior à potência média de pico estimada para a demanda da referida comunidade, conforme tabela 16.

A potência média do(s) painéis fotovoltaicos deverá ser igual ou superior à potência média e menor ou igual à potência de pico estimada para demanda da comunidade rural de Irapuá, conforme tabela 16.

O grupo gerador a biodiesel B2 foi estimado em função do eventual período de insuficiência de energia solar e/ou eólica. Portanto, o suprimento normal de eletricidade a partir de biodiesel B2 não será de forma contínua ao longo do dia. A potência média do(s) grupo(s) geradores a partir de biodiesel B2 foi estimada em função da potência de pico média diária, conforme tabela 16.

O conjunto de conversores de potência é estimado a partir da razão entre a potência de pico estimada para demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá e a potência nominal unitária do inversor padrão utilizado, conforme tabela 16.

O banco de baterias é determinado a partir da razão entre a potência de pico estimada para demanda de eletricidade da comunidade rural de Irapuá e a potência nominal unitária da bateria padrão utilizada, conforme tabela 16.

A estrutura estimada para início da simulação do sistema híbrido é mostrada na figura 44.

Tabela 16 – Estimativas de dimensionamento de componentes do sistema híbrido em função das estimativas de potências média diária e pico da comunidade rural de Irapuá (Pentecoste-CE), em 15/01/2010.

1)	Potência de pico (kW)	28	Cálculo:	Quantidade estimada	Custo (R\$)
2)	Aerogerador F30	30	Inteiro $((1)/(2)) =$	1	208.833
3)	Aerogerador Enersud 6kW	6	Inteiro $((1)/(3)) =$	5	158.713
4)	Painel Fotovoltaico	0.13	Inteiro $((1)/(4)) =$	215	394.791
5)	Inversor	1.5	Inteiro $((1)/(5)) =$	19	66.827
6)	Banco de bateria (12 V. 170 A)	2.04	Inteiro $((1)/(6)) =$	14	12.475
7)	Banco de bateria (12 V. 150 A)	1.8	Inteiro $((1)/(7)) =$	17	13.366
8)	Banco de bateria (12 V. 110 A)	1.32	Inteiro $((1)/(8)) =$	21	12.727
9)	Grupo gerador GBD20	20	Inteiro $((1)/(9)) =$	1	7.160
10)	Grupo gerador GBD15	15	Inteiro $((1)/(10)) =$	2	10.740

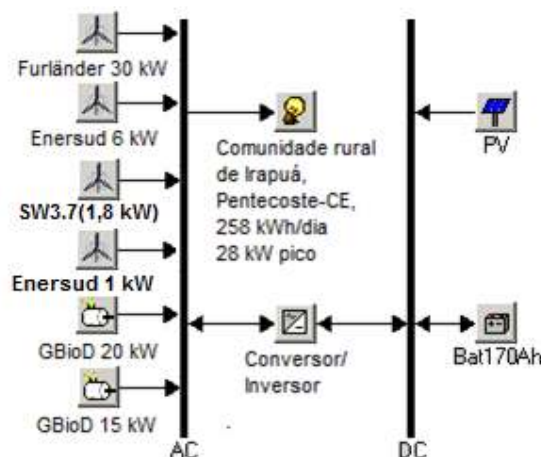


Figura 44 - Configuração inicial do Sistema Híbrido simulado para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE, conforme tabela 16.

A tabela 17 apresenta uma análise de como os resultados de custos do sistema híbrido (capaz de atender de forma alternativa a demanda de eletricidade da comunidade de Irapuá) são afetados em função da variação da velocidade do vento na região de Pentecoste-CE. Considerando que a velocidade média do vento a 10 metros acima do solo da região de Pentecoste-CE é estimada em 4,84 m/s, conforme mostrado na figura 35, os resultados mais próximos da coluna cuja velocidade do vento corresponde a 5 m/s. Mostra também que, para este estudo de caso, a configuração financeiramente ótima do sistema híbrido capaz de eletrificar a comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste é composta de 5 (cinco) aerogeradores ENERCON de 6kW cada e 1 (um) grupo gerador a partir de biodiesel B2 de 15 kW, por esta apresentar-se como melhor opção financeira dentre as várias configurações simuladas, conforme figura 45 e tabela 17.

Conforme resultado apresentado na coluna 2 da tabela 17, na condição de velocidade do vento de 4 m/s, o sistema híbrido composto de um aerogerador de 6 kW e um grupo gerador a biodiesel B2 apresenta um custo de capital inicial de R\$ 176.400,00, um custo de operação e manutenção de R\$ 15.984,00 ao ano, um custo presente total do sistema híbrido (NPC) de R\$ 380.728,80, o custo da energia elétrica produzida pode chegar até R\$ 0,3204 por kWh consumido, o consumo de 5.911 litros de biodiesel B2, uma receita financeira de R\$ 30.123,00. A estimativa de tempo de retorno do capital inicial investido em aproximadamente 6 anos, conforme equação 34. Contudo, se for considerado a razão do custo presente total do sistema

híbrido e a receita financeira esperada, o tempo de retorno do investimento pode chegar a 13 anos, conforme mostrado na última linha da tabela 17.

Tabela 17 - Resultados gerais estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste-CE, em 15/01/2010.

Velocidade do vento (m/s)	4	5	6	7
Painéis fotovoltaicos (kW)	0	0	0	0
Aerogerador EnerconV550 de 6 kW (unid.)	5	5	5	5
Aerogerador FL30 (30 kW)	0	0	0.0	0
Grupo gerador a biodiesel B2 GBD20 (kW)	0	0	0	0
Grupo gerador a biodiesel B2 GBD15 (kW)	15	15	15	15
Banco de baterias (12 V, 170 A)	0	0	0	0
Conversor de Potência (kW)	0	0	0	0
Capital Inicial (R\$)	176.400	176.400	176.400	176.400
Custo Operacional (R\$/ano)	15.984,0	12.250,8	10.693,8	10.632,6
Custo Presente Total Sist. Híbrido, NPC (R\$)	380.728,8	333.009,0	313.110,0	312.319,8
Custo da eletricidade gerada, COE (R\$/kWh)	0,320	0,279	0,263	0,261
Consumo de biodiesel B2 (Litros)	5.911	3.887	3.040	3.009
Tempo de uso de GBD15 (horas)	1.656	1.093	849	829
Receita financeira (R\$)	30.123	30.061,8	30.470,4	30.504,6
Tempo de retorno simples em função do capital inicial, conforme equação 34 (anos)	5,9	5,9	5,8	5,8
Tempo de retorno simples em função do Custo Presente Total do Sistema Híbrido (anos)	12,6	11,1	10,3	10,2

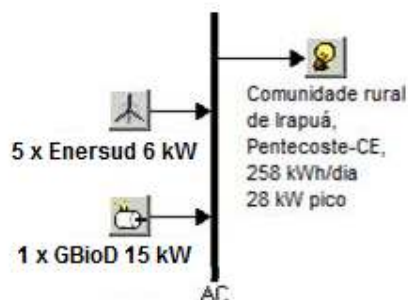


Figura 45 - Configuração de melhor viabilidade financeira para o Sistema Híbrido simulado para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá de Pentecoste-CE.

Considerando as velocidades médias do vento de 4 m/s e 5 m/s, e relacionando os respectivos Custos Presente Total do Sistema Híbrido (NPC), mostrados nas tabelas 18 e 19, com as respectivas Produção de Energia Elétrica, mostradas na tabela 20, é possível se obter a figura 46, que mostra uma análise comparativa entre o Custo Presente Total do Sistema Híbrido e a Produção Elétrica Total do Sistema, em função da velocidade do vento. Nele observa-se uma tendência ao equilíbrio e uma viabilidade financeira do sistema híbrido é a partir de velocidades de vento superiores a 4,9 m/s, quando os custos presente total do sistema híbrido serão compensados com a produção elétrica total do respectivo sistema.

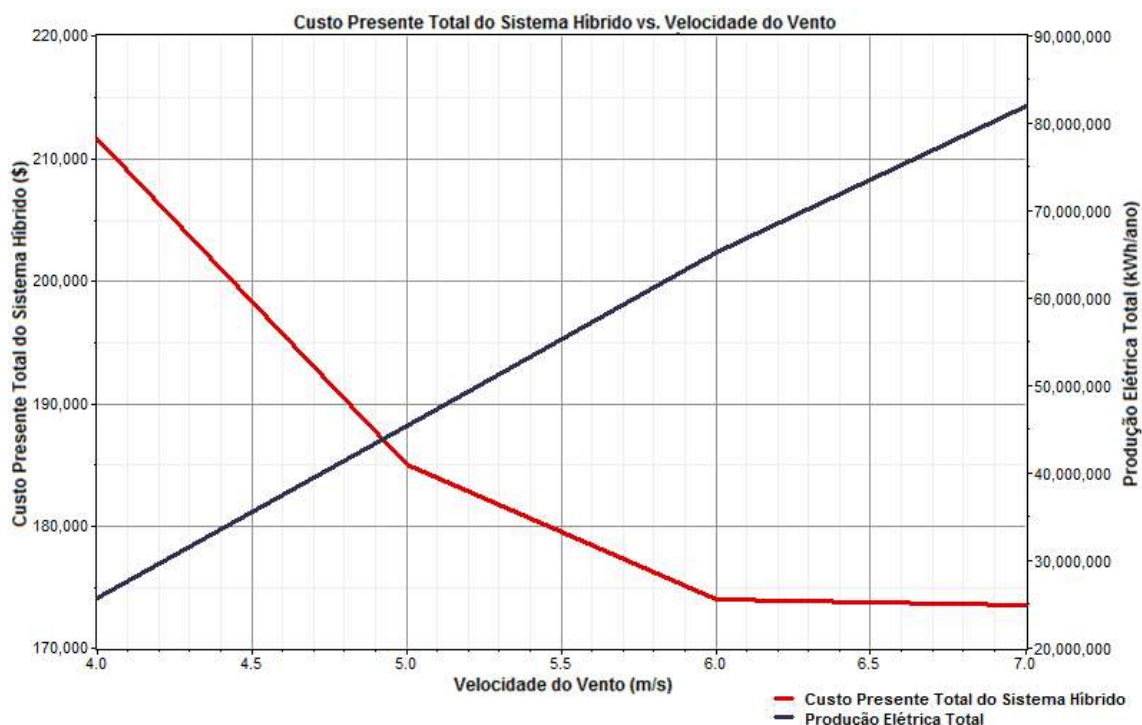


Figura 46 - Análise comparativa entre o Custo Presente Total do Sistema e a Produção Elétrica Total do Sistema Híbrido.

Foi realizado um aprofundamento dos cálculos para os casos de velocidade de vento de 4 m/s e 5 m/s para a mesma configuração de menor custo, o que resultou nas tabelas 18 e 19.

A análise comparativa das tabelas 17, 18 e 19 ratifica que a coluna 2 da tabela 17 representa a opção de sistema híbrido de menor custo para uma velocidade de 4 m/s, e que coluna 3 da tabela 17 representa a opção de sistema híbrido de menor custo para uma velocidade de 5 m/s.

Tabela 18 – Análise comparativa dos resultados estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, a partir dos dados da pesquisa de campo e de uma velocidade média de vento de 4 m/s

Painel FV (kW)	Aerog. EV550 6 kW	FL30	GBD20 (kW)	GBD15 (kW)	Banco bater. 170Ah	Conversor (kW)	Cap. Inicial (R\$)	Custo O&M (R\$/ano)	Custo Total Presente (R\$)	Custo da Energia, COE (R\$/kWh)	Bio-diesel B2 (L)
0	5	0	0	15	0	0	176.400	15.984	380.729	0,320	5,911
0	5	0	20	8	0	0	181.080	16.371	390.362	0,324	6,254
0	5	0	20	0	0	0	178.200	17.415	400.833	0,335	6,758
0	5	0	0	8	64	28	241.994	17.197	461.842	0,389	1,809
0	5	0	20	8	64	28	249.194	18.227	482.191	0,401	2,456
0	5	0	20	0	64	28	246.314	19.046	489.782	0,407	2,885
11	5	0	0	8	64	28	398.119	17.147	617.301	0,517	1,385
11	5	0	20	8	64	28	405.319	17.631	630.704	0,524	1,718
11	5	0	20	0	64	28	402.439	18.371	637.285	0,529	2,101
11	5	0	20	8	0	28	404.404	23.940	710.429	0,590	5,314
11	5	0	0	15	0	28	399.724	24.424	711.958	0,596	5,450
11	5	0	20	0	0	28	401.524	25.943	733.162	0,610	6,347
0	0	0	20	8	0	0	10.080	64.291	831.929	0,691	35,339
0	0	0	20	8	64	28	78.194	67.347	939.116	0,779	32,491
0	0	0	0	15	64	28	73.514	71.113	982.579	0,817	34,235
0	0	0	20	8	64	28	234.319	60.428	1.006.798	0,837	28,224
0	0	0	20	0	64	28	75.314	74.358	1.025.869	0,851	36,224
11	0	0	0	15	64	28	229.639	62.771	1.032.079	0,862	29,165
11	0	0	20	8	0	28	233.404	63.207	1.041.408	0,866	29,637
11	0	0	20	0	64	28	231.439	66.227	1.078.038	0,896	31,242
11	0	0	20	0	0	28	230.524	72.648	1.159.202	0,976	34,601
28	0	0	0	15	0	28	470.007	58.212	1.214.141	1,021	25,916

Tabela 19 – Análise comparativa dos resultados estimados para o sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, a partir de dados da pesquisa de campo e velocidade média de vento de 5 m/s

Painel FV (kW)	Aerog. EV550 6 kW	FL30	GBD20 (kW)	GBD15 (kW)	Banco bater. 170Ah	Conversor (kW)	Cap. Inicial (R\$)	Custo O&M (R\$/ano)	Custo Total Presente (R\$)	Custo da Energia, COE (R\$/kWh)	Bio-diesel B2 (L)
0	5	0	0	15	0	0	176.400	12.251	333.009	0,279	3.887
0	5	0	20	8	0	0	181.080	12.469	340.466	0,283	4.104
0	5	0	20	0	0	0	178.200	13.185	346.754	0,290	4.444
0	5	0	0	8	64	28	241.994	15.592	441.306	0,369	969
0	5	0	20	8	64	28	249.194	16.270	457.189	0,380	1.408
0	5	0	20	0	64	28	246.314	16.654	459.193	0,382	1.595
11	5	0	0	8	64	28	398.119	15.970	602.253	0,502	771
11	5	0	20	8	64	28	405.319	16.240	612.904	0,509	981
11	5	0	20	0	64	28	402.439	16.654	615.335	0,511	1.186
11	5	0	0	15	0	28	399.724	20.997	668.128	0,558	3.597
11	5	0	20	8	0	28	404.404	20.650	668.378	0,554	3.496
11	5	0	20	0	0	28	401.524	22.000	682.744	0,569	4.194
0	0	0	20	8	0	0	10.080	64.291	831.929	0,691	35.339
28	5	0	0	0	64	28	636.521	15.768	838.080	0,706	
0	0	0	20	8	64	28	78.194	67.347	939.116	0,779	32.491
0	0	0	0	15	64	28	73.514	71.113	982.579	0,817	34.235
11	0	0	20	8	64	28	234.319	60.428	1.006.798	0,837	28.224
0	0	0	20	0	64	28	75.314	74.358	1.025.869	0,851	36.224
11	0	0	0	15	64	28	229.639	62.771	1.032.079	0,862	29.165
11	0	0	20	8	0	28	233.404	63.207	1.041.408	0,866	29.637
11	0	0	20	0	64	28	231.439	66.227	1.078.038	0,896	31.242
11	0	0	20	0	0	28	230.524	72.648	1.159.202	0,279	3.887
28	0	0	0	15	0	28	470.007	58.212	1.214.141	0,283	4.104

As figuras 46 e 47 representam graficamente a produção de energia elétrica mensal média, respectivamente considerando as velocidades de vento a partir de 4 m/s e 5 m/s.

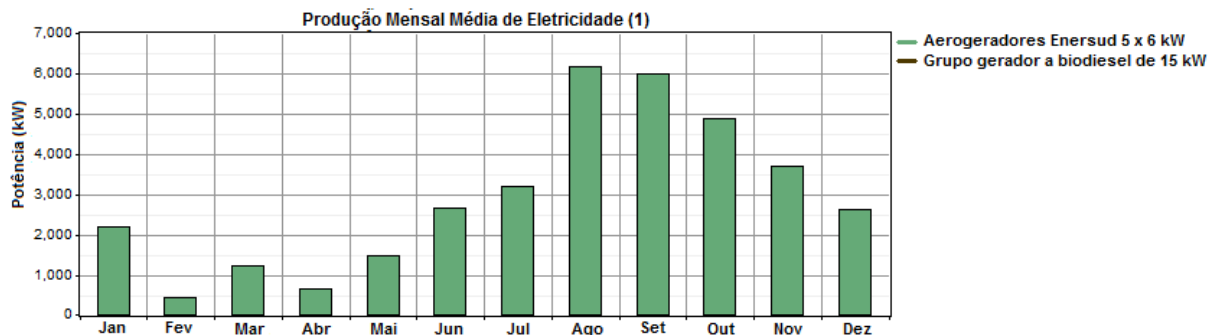


Figura 47 - Produção mensal média de eletricidade pelo sistema híbrido a partir de velocidade de vento de 4 m/s.

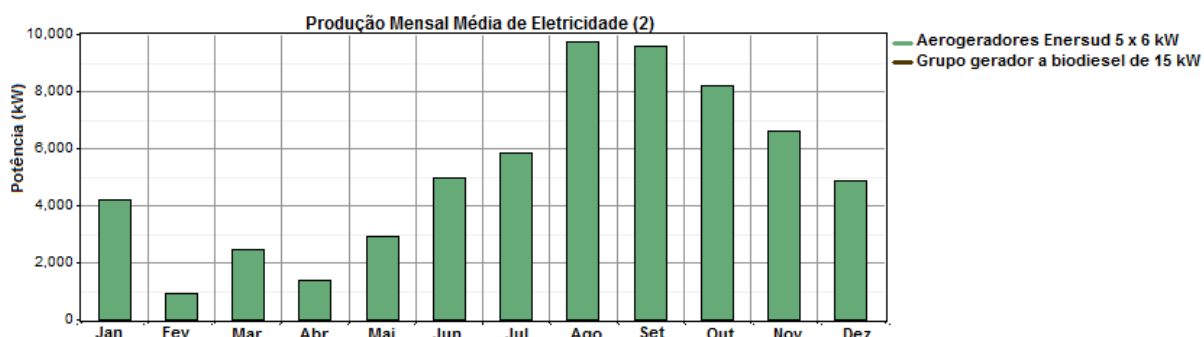


Figura 48 - Produção mensal média de eletricidade pelo sistema híbrido a partir de velocidade de vento de 5 m/s.

A tabela 20 apresenta uma análise comparativa da produção de eletricidade pelo sistema híbrido nas condições de velocidades média do vento de 4 m/s e 5 m/s. A partir da velocidade média do vento de 5 m/s o sistema híbrido apresenta uma maior produtividade em relação à condição de velocidade média do vento de 4 m/s, tornando-se menos dependente da geração a partir do grupo gerado a biodiesel B2, e conseqüentemente emitindo menor quantidade de poluentes e gases de efeito estufa para o ambiente.

Tabela 20 – Análise comparativa da produção de eletricidade pelo sistema híbrido em velocidades média de vento de 4 m/s, conforme figura 46, e 5 m/s, conforme figura 47.

Componentes do Sistema Híbrido	Produção de eletricidade a partir de velocidade de vento de 4 m/s (1)	Produção de eletricidade a partir de velocidade de vento de 5 m/s (2)
	(kWh/ano)	(kWh/ano)
5 Aerogeradores Enersud de potência nominal de 6 kW cada	25.802.078	45.358.420
1 Grupo gerador a biodiesel B2 de potência nominal de 15 kW	15.694	10.300
Total (kWh/ano)	25.817.772	45.368.720

Os sumários de custos do sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-Ce nas tabelas 21 (que considera a condição de velocidade média de vento de 4 m/s) e 22 (que considera a condição de velocidade média de vento de 5 m/s).

A tabela 21 mostra que o sistema híbrido apresenta um capital inicial total de R\$ 176.400,00, um custo de reposição R\$ 57.370,00, um custo de operação e manutenção (O&M) de R\$ 43.796,00, um custo de aquisição de combustível biodiesel B2 de R\$ 133.286,00, e uma receita financeira de R\$ 30.123,00, o que resultando em um custo total de R\$ 380.729,00.

Tabela 21 - Sumário de Custos do Sistema Híbrido para eletrificação alternativa para a Comunidade Rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/01/2010, na condição de de velocidade de vento de 4 m/s.

Componentes do sistema híbrido	Capital (R\$)	Reposição (R\$)	Operação e Manutenção, O&M (R\$)	Biodiesel B2 (R\$)	Receita financeira (R\$)	Total (R\$)
5 Aerogeradores ENERSUD 6KW	171.000	53.318	43.718	0	29.882	238.156
Grupo gerador a biodiesel B2 GBioD15kW	5.400	4.052	76	133.286	241	142.574
Sistema Híbrido	176.400	57.370	43.796	133.286	30.123	380.729

A tabela 22 mostra que o sistema híbrido apresenta um capital inicial total também de R\$ 176.400,00, um custo de reposição R\$ 55.260,00, um custo de operação e manutenção (O&M) de R\$ 43.769,00, um custo de aquisição de combustível biodiesel B2 de R\$ 87.642,00, e uma receita financeira de R\$ 30.062,00, o que resulta em um custo total de R\$ 333.009,00.

Tabela 22 - Sumário de Custos do Sistema Híbrido para eletrificação alternativa para a Comunidade Rural de Irapuá de Pentecoste-CE, em 15/01/2010, na condição de de velocidade de vento de 5 m/s.

Componentes do sistema híbrido	Capital (R\$)	Reposição (R\$)	Operação e Manutenção, O&M (R\$)	Biodiesel B2 (R\$)	Receita financeira (R\$)	Total (R\$)
5 Aerogeradores ENERSUD 6KW	171.000	53.318	43.718	0	29.882	238.156
Grupo gerador a biodiesel B2 GBioD15kW	5.400	1.942	50	87.642	180	94.855
Sistema Híbrido	176.400	55.260	43.769	87.642	30.062	333.009

Um sumário descritivo das emissões de poluentes e gases de efeito estufa produzidos pelo sistema híbrido para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste-CE é mostrado na tabela 23.

Dentre os poluentes em gases de efeito estufa mostrados na tabela 23, apresentam-se o Dióxido de Carbono (com 15.565 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 4 m/s, e 10.235 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 5 m/s), o Óxido de nitrogênio (343 kg/ano na condição de 4 m/s, e 225 kg/ano na condição de 5 m/s), o Monóxido de Carbono (com 38,4 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 4 m/s, e 25,3 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 5 m/s), e Dióxido de enxofre (com 31,3 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 4 m/s, e 20,6 kg/ano na condição de aproveitamento de ventos com velocidade de 5 m/s).

Tabela 23 - Análise comparativa de emissões de poluentes e gases de efeito estufa pelo sistema híbrido proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá em Pentecoste-CE, em 15/01/2010.

Velocidade do vento	4m/s	5m/s
Poluentes	Emissões (kg/ano)	Emissões (kg/ano)
Dióxido de Carbono	15.565,0	10.235,0
Monóxido de Carbono	38,4	25,3
Hidrocarbonetos não queimados	4,3	2,8
Particulados materiais	2,9	1,9
Dióxido de enxofre	31,3	20,6
Óxido de nitrogênio	343,0	225,0

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Um dos maiores desafios do Governo Federal consiste em prover energia elétrica, com qualidade e confiabilidade a toda população brasileira, principalmente do meio rural, que apresentam os menores índices de desenvolvimento humano (IDH), e maiores índices de famílias de baixa renda e de exclusão do uso da eletricidade no Brasil, conforme mostrado nas figuras 2, 3 e 4 e tabela 24.

O fornecimento de energia elétrica é um dos fatores estratégicos que estimula simultaneamente a melhoria dos níveis de IDH do Brasil.

O presente sistema híbrido, proposto para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá, no município cearense de Pentecoste, apresenta-se como possibilidade de contribuir para a universalização da energia elétrica no Brasil.

A aplicação de sistemas híbridos na geração de eletricidade pode proporcionar maior uso de energias alternativas e renováveis, e com isso diminuir o uso dos recursos fósseis, aproveitar os potenciais locais existentes, e ser dimensionado de acordo com a demanda elétrica de cada comunidade, podendo se de forma descentralizada e autônoma.

Conforme os resultados apresentados, um sistema híbrido combinando geração fotovoltaica, eólica e biodiesel B2 pode apresentar vantagens em relação ao sistema singelo de eletrificação por extensão de rede. Dentre as principais vantagens dos sistemas híbridos encontram-se:

- A complementariedade apresenta-se mais evidente entre as fontes solar e eólica, enquanto o biodiesel (B2) contribui para diminuir os efeitos da intermitência entre as fontes solar e eólica.
- Com a modularidade os módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas e banco de baterias podem ser adquiridos e incorporados ao sistema de forma gradativa, à medida do crescimento da demanda de eletricidade, conforme disponibilidade de potenciais solar, eólico e biodiesel, recursos financeiros e espaço para instalação.
- A combinação das vantagens anteriores pode caracterizar a vantagem de sistema de eletrificação de segurança e de baixa tolerância a falhas, na medida a eventual falta, falha ou insuficiência de uma ou mais fontes pode ser compensada por outra fonte complementar do sistema híbrido.

É possível se verificar (através da análise comparativa da produção de energia elétrica mensal média, respectivamente considerando as velocidades de

vento a partir de 4 m/s e 5 m/s, conforme figuras 46 e 47) a distribuição da produtividade de eletricidade em função do potencial eólico da região. Também é possível se observar a correlação da maior e menor produtividade de eletricidade respectivamente com o valor máximo do potencial eólico no mês de agosto e valor mínimo do potencial eólico no mês de fevereiro, conforme mostrado na tabela 8 e figura 38.

A expectativa de tempo de retorno (simples) do investimento no sistema híbrido proposto para eletrificar de forma alternativa a comunidade rural de Irapuá do município cearense de Pentecoste, mostrado na figura 45 e dimensionado na coluna 2 da tabela 17, é de aproximadamente 6 anos, se considerado em função do capital inicial, ou de 13 anos, se considerado em função do Custo Presente Total do Sistema Híbrido (NPCT). Em ambos os casos, as estimativas de tempo de retorno simples são inferiores ao tempo de ciclo de vida do sistema híbrido que é em média de aproximadamente 25 anos. Portanto, o presente sistema híbrido apresenta-se financeiramente viável, podendo apresentar, após pagamento dos respectivos custos investidos, de 9 a 12 anos de lucratividade financeira e redução de gases de efeito estufa. Contudo, sua maior importância apresenta-se na capacidade de eletrificar comunidades remotas e/ou isoladas da rede elétrica, promovendo a geração de emprego e renda, a educação, a saúde, a telecomunicação, melhoria na qualidade de vida, e o desenvolvimento sócio-econômico das respectivas comunidades.

O sistema híbrido proposto nesta dissertação pode tornar-se financeiramente mais viável com o aumento da demanda de eletricidade, ou com a priorização do direito constitucional de acesso a serviços de infraestrutura de energia elétrica.

No contexto da atual tecnologia, o suprimento de energia elétrica exclusivamente por painéis solar fotovoltaicos ainda não mostra-se financeiramente viável, em função dos ainda elevados custos de geração de eletricidade, quando comparados aos custos da geração eólica e extensão da rede elétrica de distribuição. Por isso não foi selecionado para configuração final do sistema híbrido.

Sendo a energia elétrica a infraestrutura básica capaz de promover o desenvolvimento sócio-econômico de uma região, estado e/ou país, o desenvolvimento social, econômico e ambiental pode ser promovido através da disponibilidade de energia elétrica, que por sua vez pode contribuir para melhoria da qualidade de vida, criação de emprego e renda, e outros benefícios para sociedade.

Assim sendo, torna-se evidente que investimentos em pesquisas e tecnologias de energias alternativas podem contribuir e promover a geração de eletricidade, emprego e renda, educação, saúde e lazer.

Os impactos associados à implantação de um sistema híbrido para eletrificação alternativa da comunidade rural de Irapuá, no município cearense de Pentecoste, são basicamente caracterizados nos contextos técnico, financeiro, social e ambiental.

No contexto sócio-ambiental, a análise comparativa dos dados de emissões de poluentes a partir deste sistema híbrido, a tabela 23 mostra que quanto maior o potencial eólico da região e melhor o seu aproveitamento, menores são os índices de emissão de poluente e gases de efeito estufa. Assim, o aumento dos índices de emissão de gases de efeito estufa afeta o ambiente e diminui a qualidade de vida da sociedade local e global.

Os resultados obtidos nesta dissertação podem ser melhorados através de políticas públicas comprometidas com o desenvolvimento sócio-econômico, com a promoção da universalização do uso e serviços de eletricidade, com os avanços tecnológicos e que favoreçam investimentos em pesquisas de desenvolvimento e melhoria contínua da tecnologia de energias renováveis e alternativas.

O contexto de suprimento de energia elétrica é bastante amplo, e nele existem diversas oportunidades de expansão e aprimoramento do contexto desta dissertação. Dentre as principais, pode ser interessante a substituição do biodiesel por outros biocombustíveis, a exemplo do biogás, etanol e/ou metanol.

A sugestão anterior também pode ser aplicada à utilização de outros recursos energéticos, a exemplo do potencial hidráulico das pequenas centrais hidroelétricas, tanques de hidrogênio, células combustíveis, dentre outros.

A análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa das sugestões anteriormente apresentadas pode ser outro possível trabalho futuro.

Considerando que a integração da parcela da sociedade que habita regiões remotas e/ou isoladas do Brasil com restrições aos serviços de energia é uma árdua missão do setor elétrico brasileiro e direito de cidadania, as informações disponibilizadas nesta dissertação podem ser úteis para pesquisas futuras. Assim como o respectivo método utilizado pode ser ajustado para aplicação de energias alternativas e renováveis em outros estudos de caso, regiões, estados e/ou países.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª Ed., Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília-DF, Brasil, 2008.

ANEEL, <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1999023.pdf>, acesso em 12/08/2009.

ANEEL. Tarifas Residenciais Vigentes, <http://www.aneel.gov.br>, acesso em 13/03/2010.

BANCEN, Cotação do dólar, <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas>, em 10/05/2009

BARBOSA, E. M. S., *et al.* Avaliação Técnica Social dos Projetos de Eletrificação Rural com sistemas Fotovoltaicos nos Estados de Pernambuco e Ceará. Grupo de Pesq. FAE / CELPE / COELCE / CEPEL / UFPE. 1995

BARBOSA *et al.* SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA SOLAR/EÓLICO/DIESEL PARA ELETRIFICAÇÃO DE COMUNIDADES ISOLADAS DA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA – ESTADO PRESENTE E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS. GLATEE, 2005.

BARBOSA, C. F. de Oliveira, *et al.*, 2004. Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no Estado do Pará e perspectivas frente à Universalização da Energia Elétrica. AGRENER, 2004.

BARNES, S. H. *A technique for maximizing details in numerical weather mapanalysis.* J. Appl. Meteor., 4, 396-409, 1964.

BETIOL JUNIOR, Genésio, STRAZZI, Paulo Ernesto, CARMO, José R. do *et al.* Metodologia de análise técnica para redução de custo no planejamento das obras do programa "Luz Para Todos" em São Paulo.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. Endereço eletrônico <http://www.proceedings.scielo.br>, com acesso em 20/10/2009.

BEN. Balanço Energético Nacional 2008, http://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2009, acesso em 12/08/2009.

BORGES NETO, M. R. Ferramenta Computacional ao Planejamento de Abastecimento de Eletricidade no Meio Rural, dissertação de mestrado, UFC, 2007.

CASTRO, R. M. G. Introdução à Energia Fotovoltaica. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 1ª ed, 2004.

CARVALHO, P. C. M., e COELHO JUNIOR, L. G., 2007. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA O PROGRAMA "LUZ PARA TODOS": UM ESTUDO PARA O ESTADO DO CEARÁ, I CBENS, 2007

CARVALHO, P. C. M., *et al.* Estudo Estatístico de Radiação Solar Visando o Projeto de Unidades de Dessalinização Acionadas Por Painéis Fotovoltaicos Sem Bateria, AGRENER, 2004.

- CARVALHO, P. M. de. Energia eólica. Fortaleza, imprensa Universitária, 2003.
- CEPEL/CRESESB. Tutorial de Energia Solar - Princípios e Aplicações. <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial>, acessado em 26/05/2008.
- Tutorial de Energia Eólica - Princípios e Aplicações. <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial>, acessado em 26/05/2008.
- Energia Solar e Eólica no Brasil – Projetos Implementados. <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial>, acessado em 26/05/2008.
- COELCE. Tarifas de Fornecimento (Sistema de Baixa Tensão), <http://www.coelce.com.br>, acesso em 20/03/2010.
- COSTA, A. A.; Apostila de Modelagem Atmosférica. Fortaleza: Edição independente, 2003.
- COSTA, H. Scalabrini, e DA COSTA, R. A. Lima, 2000. Análise Comparativa Econômica entre Diferentes Opções para a Eletrificação Domiciliar Rural, Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 31, n. 3, p. 320-328, jul-set/2000, http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/Publicacoes/REN-Numeros_Publicados/docs/ren2000_v31_n3_a3.pdf, acesso em 20/12/2009.
- COTTON, W. *et al.* RAMS 2001: *Current status and future directions. Meteorology and Atmospheric Physics, Springer, 2003.*
- CRAVEIRO, P. M. A., *et al.* Relatório Técnico – Suprimento de Água para Pequenas Comunidades via Energia Fotovoltaica – Relatório Final. COELCE/DFACE. Fortaleza, 1995.
- CREDER, Hélio. Instalações Elétricas, Ed. LTC, 14^a edição, 2006.
- DE SOUSA, Luis José Oliveira. Análise dos mecanismos de geração de turbulência no Semi-Árido do Nordeste brasileiro usando o Modelo RAMS. Dissertação de mestrado, UECE, 2008
- EDMINISTER, J. A. Circuitos Elétricos. 2^a ed., Ed. Coleção Schaum, São Paulo, Editora McGraw- Hill LTDA, 1991.
- ELETOBRAS, <http://www.eletobras.gov.br>, acesso em 12/08/2009
- ENERSUD, <http://enersud.com>, acesso em 02/01/2010.
- EOLICARIO, <http://www.eolicario.com.br>, acesso em 24/04/2009.
- DEMIROREN A, YILMAZ U. *Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gokceada, Turkey: An island example. Renewable and*

Sustainable Energy Reviews (2009), doi:10.1016/j.rser.2009.06.030; www.elsevier.com/locate/rser, acesso em 15/11/2009.

DOU. Tabela de Preços dos Combustíveis publicada no Diário Oficial da União em 09/06/2009, site <http://www.jusbrasil.com.br/diarios/706171/dou-secao-1-09-06-2009-pg-23/pdfView>, de 09/06/2009, acessado em 05/03/2010.

FEDRIZZI, M. C. e SAUER, I. L. Bombeamento Solar Fotovoltaico, Histórico, Características e Projetos. Coletânea de Artigos – Energias Solar e Eólica, Vol. 1, CRESESB-CEPEL, Rio de Janeiro, Setembro de 2003.

FERRET, <http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/home>, acesso em 14/01/2009

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, www.funceme.br, acesso em 30/10/2009.

GARCÍA, Felipe Hernandez, Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos, tese de Doutorado, UFRS, 2004.

GTES. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos / Rio de Janeiro, CRESESB, 1999.

GUARDABASSI, Patrícia Maria. SUSTENTABILIDADE DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA PERSPECTIVAS PARA PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO. Dissertação, Universidade de São Paulo, 2006

HINRICHS, R. A., e KLEINBACH, M. Energia e o meio ambiente - tradução da 3^a ed. norte-americana, [tradução técnica: Flávio Maron Vichi, Leonardo Freire de Melo], Ed. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2003.

HALLIDAY, D. & RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. RJ, Livros Técnicos e Científicos, 1991.

HAYT JR, W. H. e KEMMERLY, J. E. [tradução de José Rubens Dória Porto], Análise de Circuitos em Engenharia, McGraw-Hill do Brasil, 1975.

HOMER, <http://www.nrel.gov/homer/>, acesso em 11/09/2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, www.ibge.gov.br, acesso em 20/07/2009.

IPRECE. Perfil Básico Municipal de Pentecoste. Governo do Estado do Ceará, 2007.
KININGER, Frank. Photovoltaic Systems Technology, Universitat Kassel, 2003, www.uni-kassel.de/re, acesso em abril/2008

LANDER, Cyril W. Eletrônica Industrial: teoria e aplicações; tradução e revisão técnica Devair Aparecido Arrabaça, Paulo Sérgio Pazzinato – São Paulo, Ed. McGraw-Hill, 1988.

LEÃO, R. GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, 2008, www.dee.ufc.br/~rleao, acesso em 15/08/2009

LIU, Kuo-nan. *Solar radiation at the top of the atmosphere*. In: LIU, Kuonan. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Slat Lake City: Academic Press, 1980. Cap. 2, p. 35-48.

LIMA, Edna Cristina Sodré. 2004. ANÁLISE DE UM COMPLEXO CONVECTIVO DE MESOESCALA (CCM) OBSERVADO NA REGIÃO NORTE DA ARGENTINA NO DIA 27 DE NOVEMBRO DE 2002: UM ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O MODELO RAMS. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul – Brasil Fevereiro de 2004.

MALVINO, Albert P. Eletrônica. Ed. Makron Books, São Paulo, 1997. Vol. 1.

MANWELL, J.F., MCGOWAN, J. G. e ROGERS, A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. University of Massachusetts, Amherst, USA. Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2002.

MARQUES, H. *et al.* Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. Itajubá, MG: FUPAI-MME-ANEEL-ELETROBRAS-PROCEL, 2006.

MATIAS, W. F., GOMES, J. M. Matemática Financeira, Ed. Atlas, 1987.

MENESES, G. M. Lima. ANÁLISE E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA MAMONA PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM FUNÇÃO DO PERÍODO CHUVOSO NO ESTADO DO CEARÁ. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Ceará, 2005.

MENEZES NETO, Otacílio Leandro de. 2007. Metodologia para estimativa de radiação solar aplicada a região do Nordeste do Brasil. Dissertação de mestrado, UECE, 2007.

MME. www.mme.gov.br, acesso em 19/07/2009.

-----<http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos>, acesso em 27/12/2009.

-----Prioridades para atendimento do PLPT, <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos>, acesso em 27/12/2009.

----- Programa Luz para Todos tira 11 milhões da escuridão, acesso do site http://www.mme.gov.br/mme/noticias/destaque_foto/destaque_0060.html, em 10/01/2010.

----- Informativo Tarifário de Energia Elétrica, site www.mme.gov.br, acesso em 20/01/2010

NASA, <http://cdf.gsfc.nasa.gov>, acesso em 13/05/2009

NCEP/NCAR. The NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis>, acesso em 30/10/2009.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.noaa.gov>

NREL, <http://www.nrel.gov>, acesso em 11/09/2009

NUTEC, <http://www.nutec.ce.gov.br/categoria5/NUTEC-BIODIESEL.pdf>, acesso em 22/08/2009.

O'MALLEY, JOHN – ANÁLISE DE CIRCUITOS, Tradução de Alves, S. R., revisão técnica de Nicolosi, D. E. C., McGraw- Hill do Brasil, 1983. 370p. 4, 5, 6.

O POVO, “Sete parques eólicos começam a ser instalados ainda em 2010: Energia”, Reportagem jornalística do caderno de Economia, 25/03/2010.

----- “Governo (do Ceará) destina R\$ 10 mi para abrir clube de investimento: Energia Solar”, Reportagem jornalística do caderno de Economia, 30/06/2009.

----- “O que os ventos trazem: Energia Eólica”, Reportagem jornalística do caderno de Economia, 05/04/2009.

PBDCE. Governo do Estado do Ceará, <http://www.ceara.gov.br/ceara/governo/projetos-estruturantes-1/programa-biodiesel-do-ceara>, com acesso em 05/02/2010.

PDTI, http://www.eletronbras.com/EM_Programas_Pdti/default.asp, acesso em 20/08/2009.

PNUD, <http://www.pnud.org.br>, acesso em 20/12/2009.

PIELKE, R. A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. San Diego: Academic Press. 2002.

PNE 2030, Plano Nacional de Energia – PNE 2030, Ministério de Minas e Energia, Governo Federal do Brasil, www.mme.gov.br, 2008.

----- INFORME À IMPRENSA, Plano Nacional de Energia – PNE 2030, Rio de Janeiro, 26/06/2007.

PNPB, <http://www.biodiesel.gov.br/faq.html>, acesso em 12/08/2009.

PNUD, <http://www.pnud.org.br>, acesso em 20/12/2009.

PROCEL, <http://www.eletronbras.gov.br/ELB/procel>, acesso em 02/02/2010.

RESNICK, Robert e HALLIDAY, David. Física vol. I, 4ª ed., Ed. LTC S/A, 1984.

RODRIGUES, Alexia de Freitas. Análise da Viabilidade de Alternativas de Suprimento Descentralizado de Energia Elétrica a Comunidades Rurais de Baixa

Renda com Base em seu Perfil de Demanda. Dissertação de Mestrado junto a Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

SAGHIR; JAMAL. Energy and Poverty: Myths, Links, and Policy Issues - Energy Working Notes – Energy and Mining Sector Board N° 4; May 2005.

SALAMONI e RUTHER. O POTENCIAL BRASILEIRO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA: ANÁLISE DE PARIDADE DE REDE. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto na Ambiente Construído, Ouro Preto, 08 a 10 de agosto de 2007.

SANTOS, R. Z. DE ABREU, *et al.* Estudo para Implantação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico na UFRJ Campus Ilha do Fundão, AGRENER 2008, acessado de <http://146.164.33.61>, em 18/08/2008.

SAUER, Ildo Luís, *et al.* Energias renováveis: ações e perspectivas na Petrobras. BAHIA ANÁLISE & DADOS, Salvador, v. 16, n. 1, p. 9-22, jun. 2006

SEINFRA-CE. Governo do Estado do Ceará – Secretaria da Infra-Estrutura, <http://www.seinfrace.gov.br>, acesso em 05/08/2008.

----- <http://www.seinfra.ce.gov.br>, acesso em 05/02/2010.

SOBRINHO, J. D. V. Matemática Financeira, Ed. Atlas, 1987.

SOLAR, <http://www.solarbrasil.com.br>, acesso em 27/12/2009.

COELCE. Tarifas de Fornecimento do Sistema Convencional de Baixa Tensão referente a fevereiro de 2010 praticadas pela Coelce, acessado de www.coelce.com.br, em 05/03/2010.

SOUSA, Djalma Gomes de. Análise da precipitação simulada pelo modelo BRAMS 2.0 usada para obtenção de vazões afluentes em alguns reservatórios do Ceará que apresentam potencial para geração hidrelétrica. Dissertação de Mestrado junto ao MCFA/UECE - Fortaleza, 2007.

Southwest Windpower, <http://www.windpower.com>, em 05/12/2009.

TRIPOLI, G. J. and COTTON, W. R. *The Colorado State University three-dimensional cloud mesoscale model. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments.* J. Rec. Atmos., 16, 185-219, 1982.

UECE. Informe universitário da UECE, www.uece.br, acesso em 05/03/2010.

REIS, M. M., OLIVEIRA JR, D. S., CARVALHO, P. C. M. Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo. http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Fontes%20Alternativas/analise_custo_ger_eolico_1kW.pdf, acesso em 02/01/2010.

ANEXOS:

Anexo 1: Tabela 24 – Relação dos Estados do Brasil com seus respectivos Percentuais de Brasileiros com renda per capita abaixo de R\$ 75,50, com o Percentual de Domicílios com eletricidade e com o Índice de Desenvolvimento Humano dos Estados Brasileiros

Estado Federativo	Percentual de brasileiros com renda per capita abaixo de R\$75,50, em 2000	Percentual de brasileiros vivem em domicílios com energia elétrica, em 2000	Índice de Desenvolvimento Humano Estadual, em 2000
Acre	47,83	76,16	0,70
Alagoas	62,24	89,87	0,65
Amapá	42,95	95,35	0,75
Amazonas	52,97	82,19	0,71
Bahia	55,32	80,97	0,69
Ceará	57,00	88,32	0,70
Distrito Federal	16,07	99,68	0,84
Espírito Santo	28,04	98,70	0,77
Goiás	26,65	97,22	0,78
Maranhão	66,81	78,73	0,64
Mato Grosso	27,78	89,43	0,77
Mato Grosso do Sul	28,66	95,63	0,78
Minas Gerais	29,77	95,63	0,77
Paraíba	55,26	94,44	0,66
Paraná	23,69	97,71	0,79
Pará	51,89	76,73	0,72
Pernambuco	51,31	95,43	0,71
Piauí	61,81	74,68	0,66
Rio de Janeiro	19,23	99,55	0,81
Rio Grande do Norte	50,63	94,31	0,71
Rio Grande do Sul	19,69	97,86	0,81
Rondônia	35,20	83,85	0,74
Roraima	35,90	86,20	0,75
Santa Catarina	16,24	98,59	0,82
São Paulo	14,37	99,66	0,82
Sergipe	53,99	91,85	0,68
Tocantins	50,79	77,38	0,71

Fonte: Adaptado do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2000, <http://www.pnud.org.br>, acesso em 20/12/2009.

Anexo 2: Visualização da estimativa do potencial eólico do Ceará, calculados com auxílio do RAMS e FERRET, conforme figuras 56 e 57.

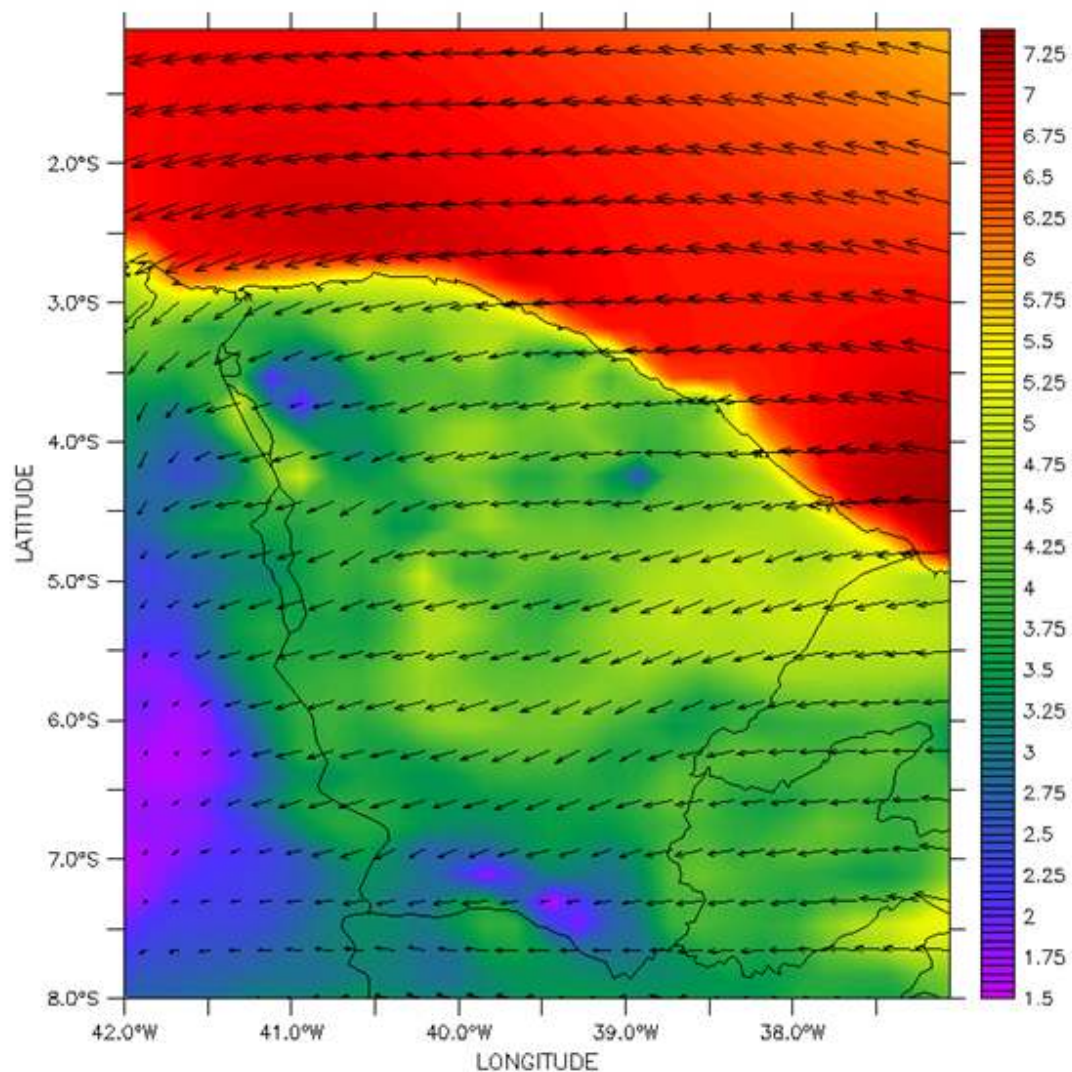


Figura 49 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET

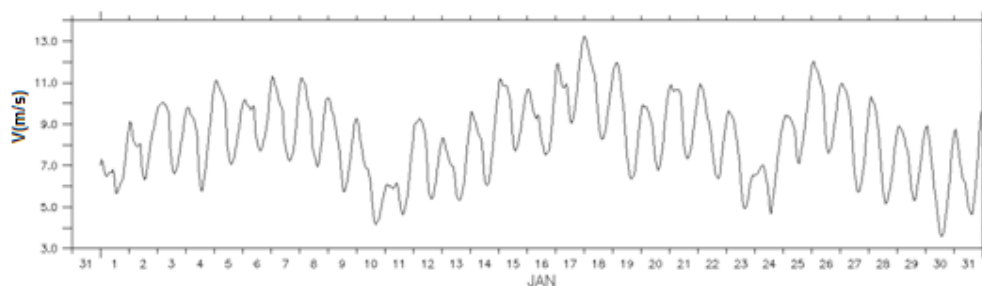


Figura 50 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento (m/s por dia) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET

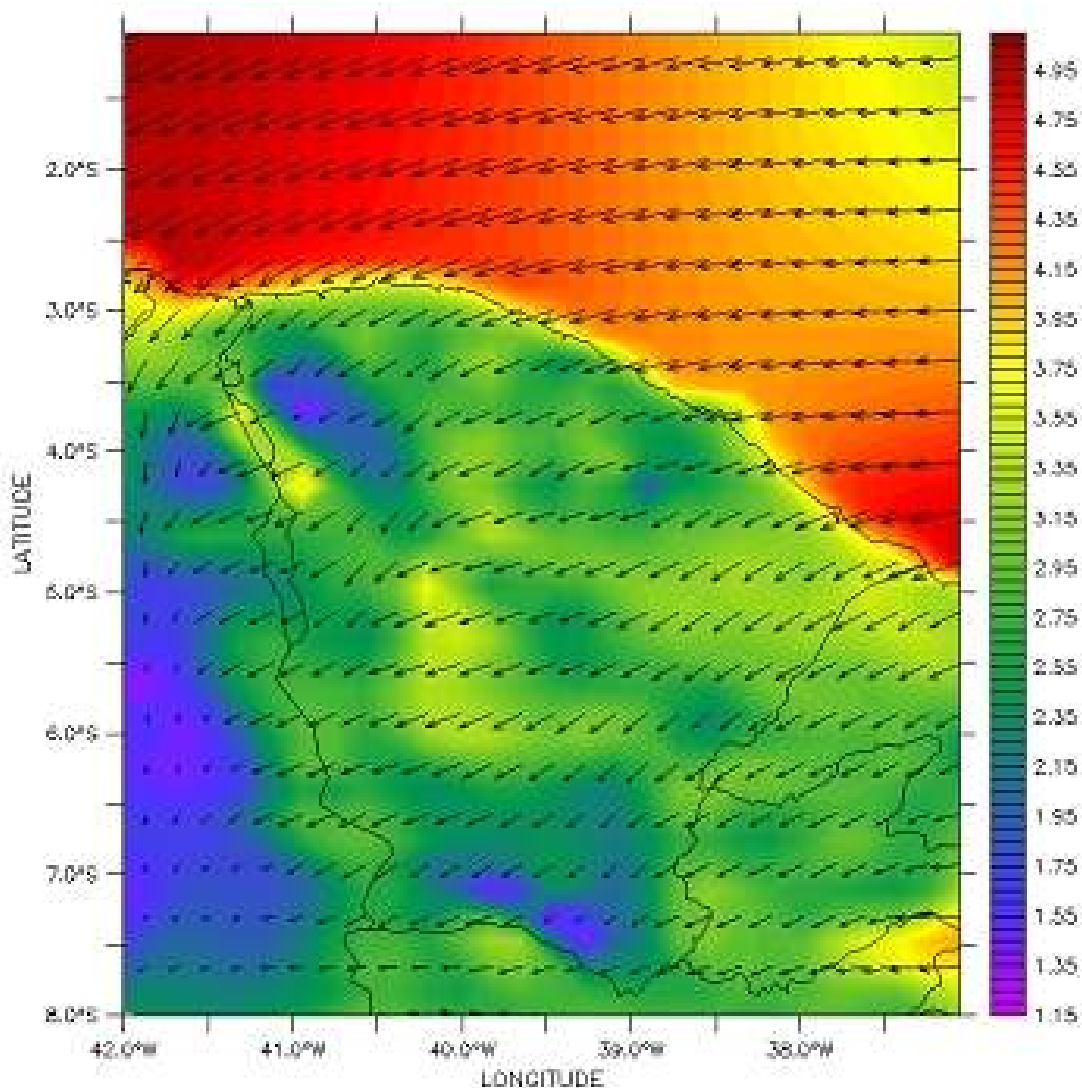


Figura 51 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de fevereiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET

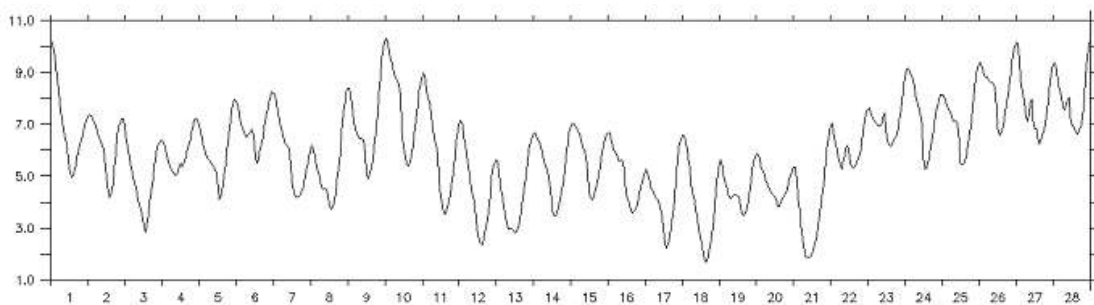


Figura 52 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento (m/s por dia) no Ceará para o mês de fevereiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET

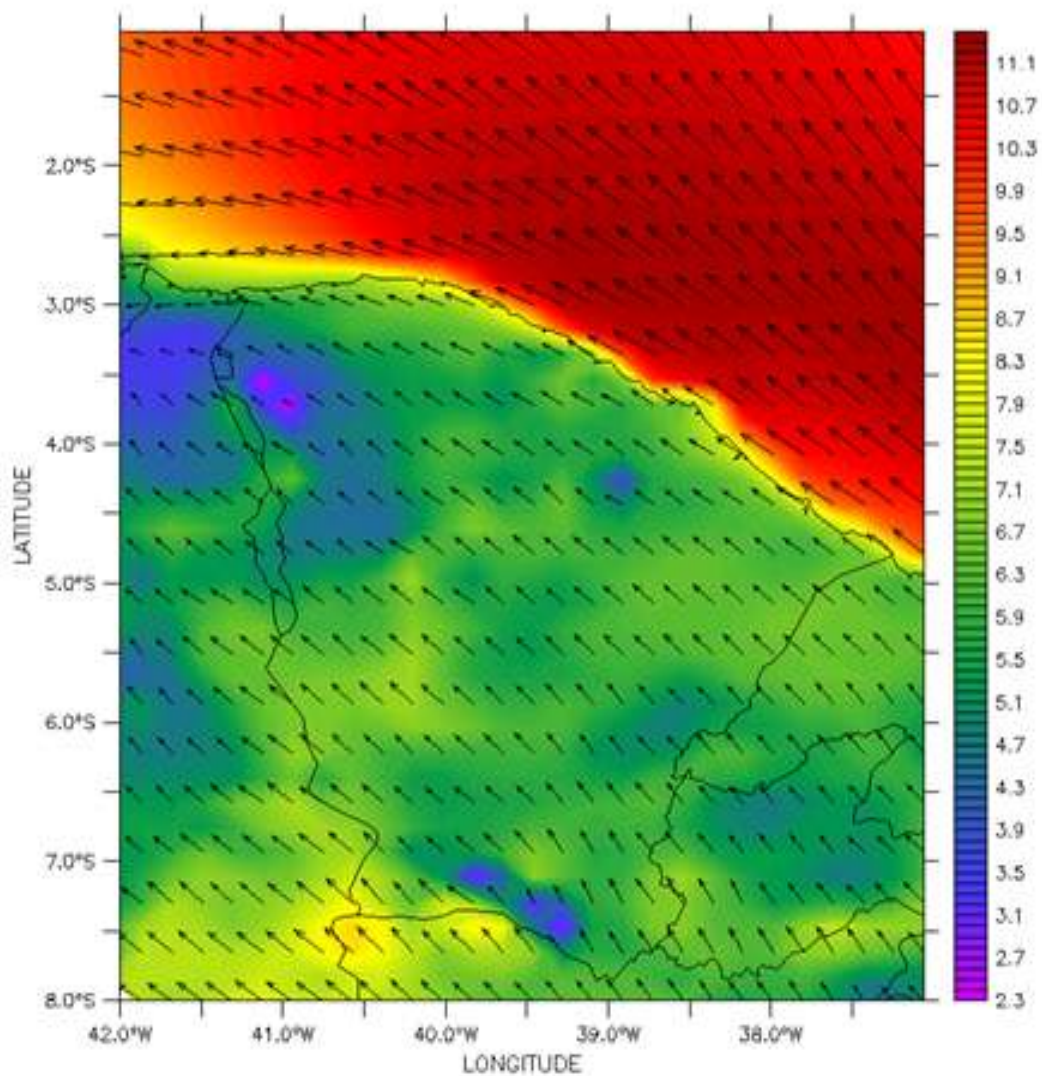


Figura 53 - Estimativa da velocidade média de vento (m/s) no Ceará para o mês de agosto, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET

Anexo 3: Visualização da estimativa de radiação solar do Ceará para os meses de janeiro, abril e setembro, calculados com auxílio do RAMS e FERRET, respectivamente conforme figuras 54, 56 e 58, respectivos perfis.

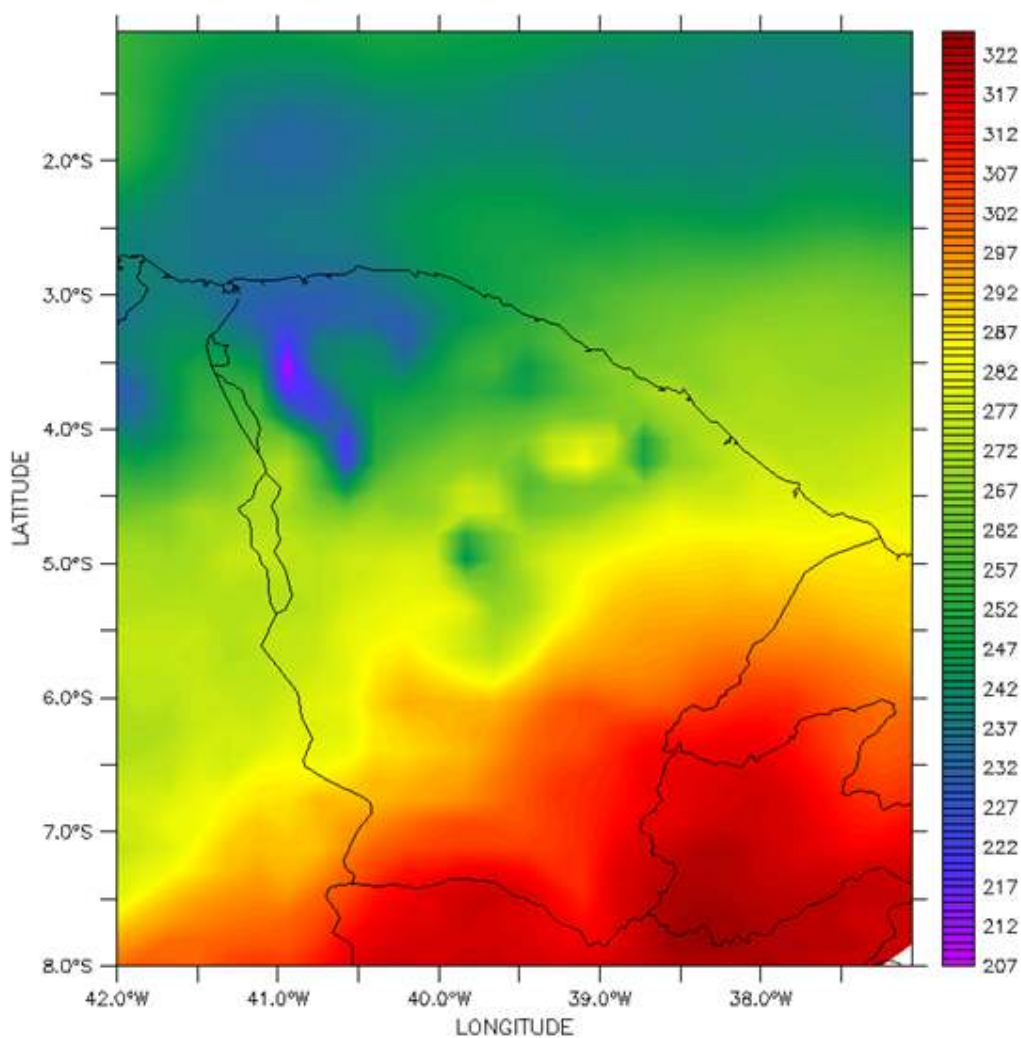


Figura 54 - Estimativa da Radiação Solar (W/m^2) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e FERRET.

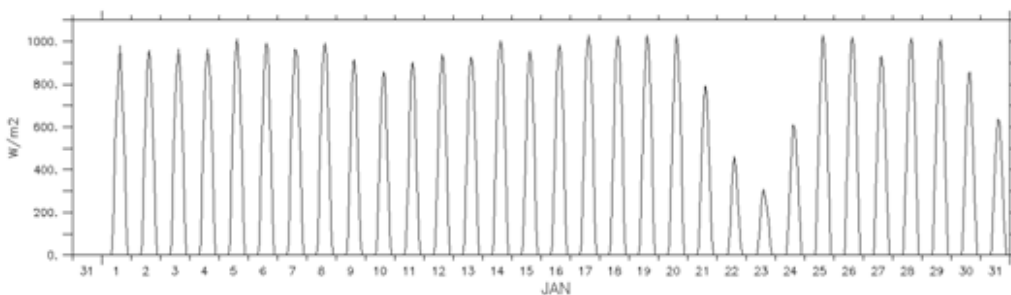


Figura 55 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento ($W/m^2/dia$) no Ceará para o mês de janeiro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e FERRET

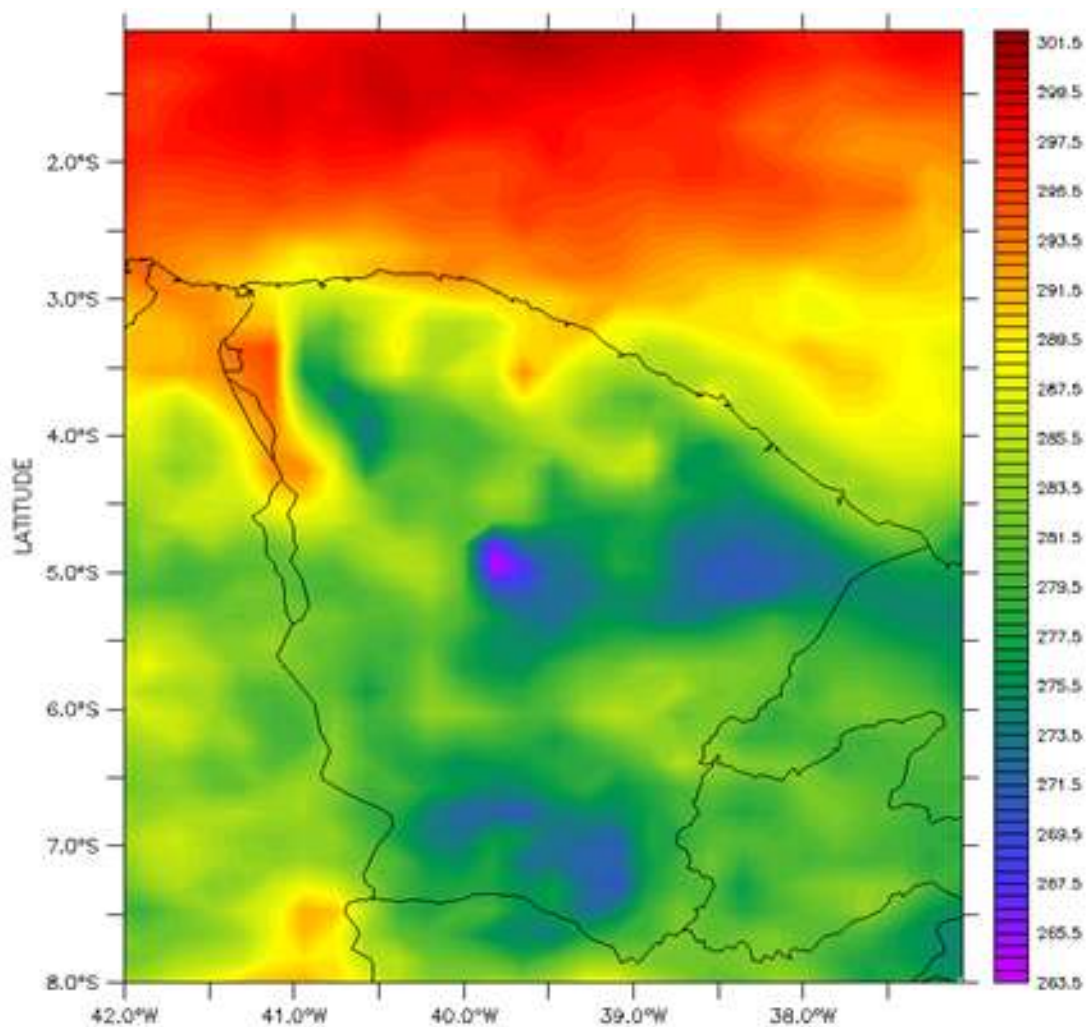


Figura 56 - Estimativa da Radiação Solar (W/m^2) no Ceará para o mês de abril, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e do FERRET.

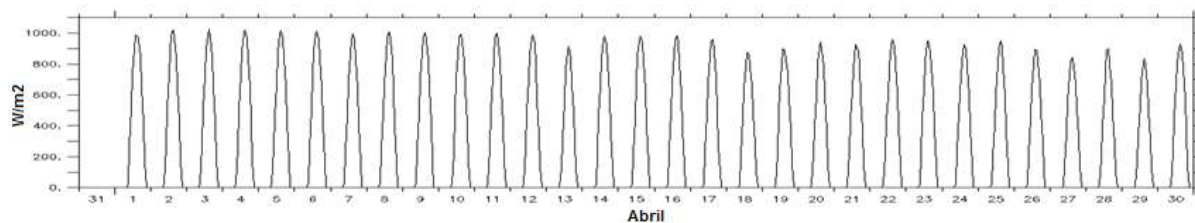


Figura 57 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento ($W/m^2/dia$) no Ceará para o mês de abril, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.

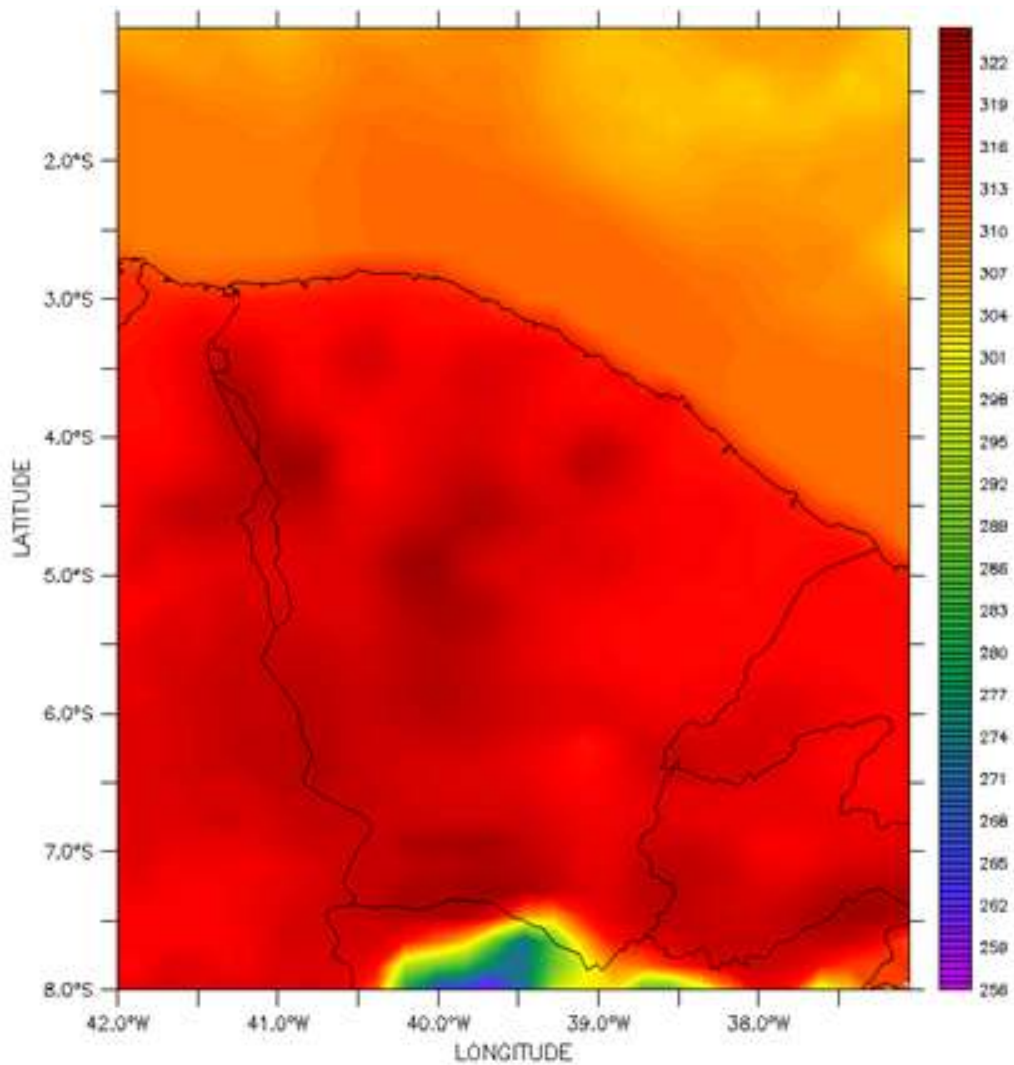


Figura 58 - Estimativa da Radiação Solar (W/m²) no Ceará para o mês de setembro, calculada em 15/01/2010 como auxílio computacional do RAMS e do FERRET.

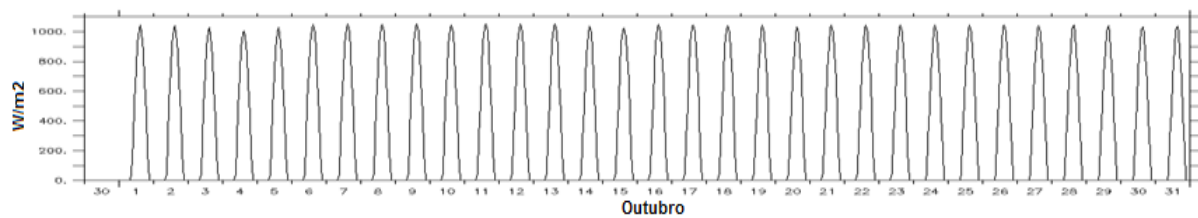


Figura 59 - Perfil da estimativa da velocidade média de vento (W/m²/dia) no Ceará para o mês de setembro, calculada em 15/01/2010 com o auxílio computacional do RAMS e do FERRET.

Anexo 4: Pesquisas acadêmicas desenvolvidas durante o Mestrado

Participação e submissão de trabalhos científicos para publicações em congressos e/ou revistas técnicas da área:

Participação e apresentação de trabalhos científicos como primeiro autor no Congresso Internacional POWER FUTURE 2009, de 29 a 01 de julho de 2009:

- Estudo do aproveitamento do potencial eólico do Estado do Ceará;
- Estudo da Utilização do Potencial de Radiação Solar Estado do Ceará para atender a demanda residencial de pequeno porte;
- Otimização de Sistema Híbridos em aplicações de pequeno porte para Produção de Energia Elétrica no Estado do Ceará;

Participação e apresentação de trabalhos científicos como segundo autor no Congresso Internacional POWER FUTURE 2009, de 29 a 01 de julho de 2009: como segundo autor:

- Produção de filmes finos de CdTe para aplicação em células solares.

Participação como primeiro autor da SEMANA UNIVERSITÁRIA 2009 DA UECE:

- Aplicação do potencial eólico na eletrificação de comunidades rurais do município cearense de Pentecoste,
- Aplicação do potencial solar fotovoltaico na eletrificação de comunidades rurais do município cearense de Pentecoste;
- Aplicação de sistemas híbridos na eletrificação de comunidades rurais do município cearense de Pentecoste;

Atualmente encontra-se em processo de submissão até 29/03/2010 de trabalhos científicos para publicação no III Congresso Brasileiro de Energia Solar, de 21 a 24 de setembro de 2010.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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