



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT 27
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS (GPT)

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO COM FONTES RENOVÁVEIS E GERAÇÃO DIESEL NA ILHA DA TRINDADE

Antonio Leite de Sá*
Márcia da Rocha Ramos
Lauro Barde Bezerra
Ana Paula C. Guimarães
Ricardo Marques Dutra
Marco Antônio E. Galdino
Ary Vaz Pinto Júnior

Angelo A. Mustto Cabrera

Antônio Augusto Gonçalves
José Conde Navega
Lúcia de Oliveira Ribeiro

CEPEL

FPLF

ELETROBRÁS

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica desenvolvidos para a implantação de um sistema híbrido utilizando fontes renováveis (solar e eólica) de energia na Ilha da Trindade. O objetivo principal é o suprimento energético local a partir de um sistema cuja configuração permita a redução máxima de operação do grupo gerador Diesel. Fazem parte do desenvolvimento do estudo, o levantamento dos recursos solar e eólico da região, o levantamento da curva de carga típica local e, por fim, as análises comparativas das alternativas possíveis de configuração do sistema híbrido.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema Híbrido, Energia Solar Fotovoltaica, Energia Eólica, Grupo Gerador Diesel.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas híbridos de energia elétrica são estabelecidos a partir da conjugação de duas ou mais tecnologias de geração, levando em consideração a disponibilidade local de recursos energéticos. Tendo em vista o potencial de energias renováveis no país, torna-se importante o desenvolvimento de estudos que permitam uma avaliação da aplicabilidade de sistemas dessa natureza, sobretudo, para o atendimento de regiões isoladas e de difícil acesso.

Os estudos realizados, neste trabalho, fazem parte do projeto básico elaborado para subsidiar o documento referente ao convênio de cooperação técnico-financeira a ser celebrado entre Marinha do Brasil, ELETROBRÁS e CEPEL, o qual trata da implantação de um sistema híbrido utilizando fontes renováveis de energia na Ilha da Trindade.

A Ilha da Trindade situa-se no Oceano Atlântico Sul, aproximadamente no paralelo de Vitória (ES), afastada cerca de 1.140km da costa. Em função da importância estratégica para o país (exploração científica e econômica), a sua gestão é feita pela Marinha do Brasil, sob administração do Primeiro Distrito Naval (RJ). O controle local e efetivo é realizado através do Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade (POIT), em funcionamento desde 1957. A soberania brasileira sobre o território assegura, entre outras coisas, o direito à exploração da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), nos termos das convenções e dos tratados internacionais. Na Ilha ficam hospedados cerca de 30 militares e o atendimento de energia elétrica é realizado por um grupo gerador Diesel que consome 5000 litros de óleo por mês. A área total da Ilha é de 13,5km² e a área prevista para a implantação do sistema híbrido, de acordo com as condições geográficas locais, é de, aproximadamente, 0,4km² – correspondendo a 3,0% da área total.

O objetivo principal do projeto é o suprimento energético local a partir de um sistema cuja configuração permita a redução máxima de operação do grupo gerador Diesel. A metodologia do estudo em questão, compreende o levantamento dos dados característicos da Ilha considerando recursos energéticos e curva de carga típica e o estabelecimento das alternativas possíveis de configuração do sistema híbrido para desenvolvimento das análises comparativas. As configurações obtidas nesta última etapa da metodologia foram obtidas utilizando um modelo computacional denominado HOMER, desenvolvido pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory), o qual é capaz de simular dimensionamento e operação dos sistemas descentralizados de geração de energia (renováveis e não renováveis) para localidades remotas.

2.0 - DADOS CARACTERÍSTICOS DA ILHA

Os dados característicos da Ilha, que foram utilizados de base para o desenvolvimento do estudo, dizem respeito aos recursos renováveis energéticos e à demanda efetiva de energia elétrica local. Dessa forma, nos tópicos 2.1, 2.2 e 2.3, são descritos, respectivamente, o levantamento do potencial eólico, o levantamento do potencial solar e o levantamento da curva de carga típica.

2.1 Levantamento do Potencial Eólico

O levantamento do potencial eólico em uma região é realizado a partir da medição e coleta de dados ambientais - velocidade e direção dos ventos, temperatura, umidade e pressão atmosférica -, com instrumentação adequada no local e na altura prevista para os aerogeradores. Os dados específicos para o levantamento do potencial eólico da Ilha estão sendo medidos desde novembro de 2004. O sistema de medição contém um anemômetro e um sensor de direção instalados em uma altura de 24m, além de um sensor de temperatura e umidade, um sensor de pressão e um *datalogger* para aquisição e armazenamento dos dados medidos. A medição dos dados é realizada com uma frequência de 1 Hz e cada registro armazenado no *datalogger* corresponde ao valor médio obtido em intervalos de 10 minutos (600 medições).

Para realizar as medições do potencial dos ventos na região, foi selecionada uma área plana e inclinada, a cerca de 600 metros de distância do POIT (Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade), cuja formação geográfica apresenta evidências de que foi formada pelos ventos predominantes da região. O período das medições, iniciado em novembro de 2004, consolida uma série histórica anual com as medições realizadas até outubro de 2005. A Figura 2.1(a) mostra o comportamento dos ventos ao longo do período descrito de acordo com o valor médio das velocidades mensais. Observa-se que os maiores valores médios de velocidade ocorreram nos meses de fevereiro e agosto, enquanto que os valores mais baixos aconteceram nos meses de março e abril. A Figura 2.1(b) apresenta a curva do dia típico para o período analisado, obtida a partir dos valores médios horários de velocidade. Em todos os casos as velocidades médias horárias superaram os 6,0 m/s, atingindo um valor máximo de 7,2 m/s. O resultado mostra que as maiores intensidades horárias dos ventos concentram-se, em geral, durante o dia.

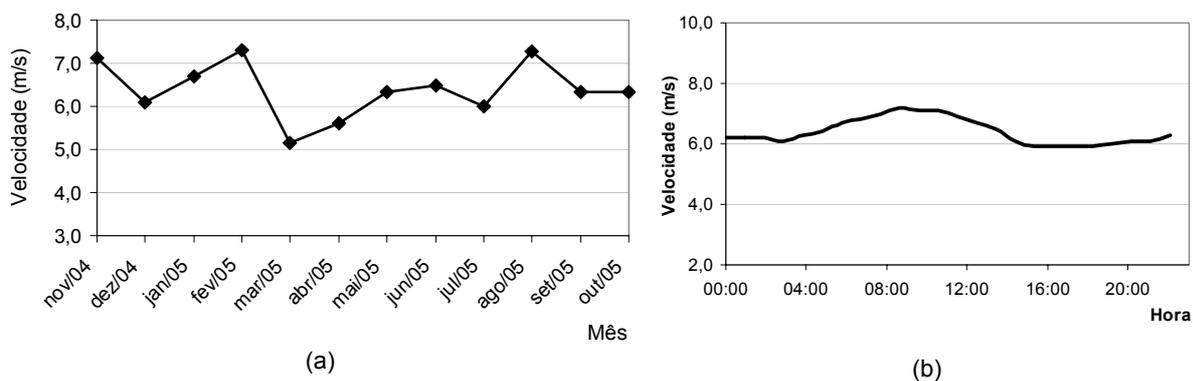


FIGURA 2.1 – (a) Valores médios mensais de velocidade de vento; (b) Curva característica do dia típico de velocidades do vento

Para descrever o regime dos ventos, os dados medidos foram tratados e analisados utilizando a distribuição de probabilidade de Weibull (2001). A distribuição de Weibull é uma função biparamétrica muito utilizada em aplicações para aproveitamento da energia eólica, expressa por:

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

com uma função cumulativa de probabilidade $F(v)$ da forma

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right],$$

onde v é a velocidade do vento, e cujos dois parâmetros, k e c , são definidos como: i) fator de forma, k , que indica a uniformidade da distribuição dos valores da velocidade e, ii) fator de escala, c , que está relacionado à velocidade média do vento. O cálculo da velocidade média do vento em função dos parâmetros k e c é obtido a partir de

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right),$$

onde Γ representa a função Gamma.

Para obtenção dos parâmetros descritos, assim como das freqüências de ocorrência da direção e da velocidade dos ventos (rosa dos ventos e histograma), foi utilizado o programa computacional de simulação WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*).

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores da velocidade média e dos parâmetros da distribuição de Weibull correspondentes ao período analisado. O cálculo da densidade de potência efetuado pelo WASP utiliza o valor da densidade do ar nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

TABELA 2.1 – Parâmetros da distribuição de Weibull do período medido

Período	Velocidade Média (m/s)	c (m/s)	k	Densidade de Potência (W/m ²)
Nov/04 a Out/05	6,5	7,2	3,17	228

Nas Figuras 2.2(a) e 2.2(b) são apresentados, respectivamente, o histograma de velocidades e a freqüência de distribuição da direção dos ventos (rosa dos ventos).

A análise do período coletado permitiu verificar que a localidade apresentou ventos freqüentes em dois quadrantes bem definidos. Embora não apresentem intensidades altas, devido ao relevo da Ilha, os ventos são praticamente constantes e ocorrem nos setores em que não existem obstáculos importantes. As análises dos dados permitiram, também, identificar que os ventos na região são promissores, levando em consideração um sistema isolado. Os índices de calmaria ficaram na ordem de 15%, valor baixo mesmo considerando como calmaria todos os ventos inferiores a 4m/s.

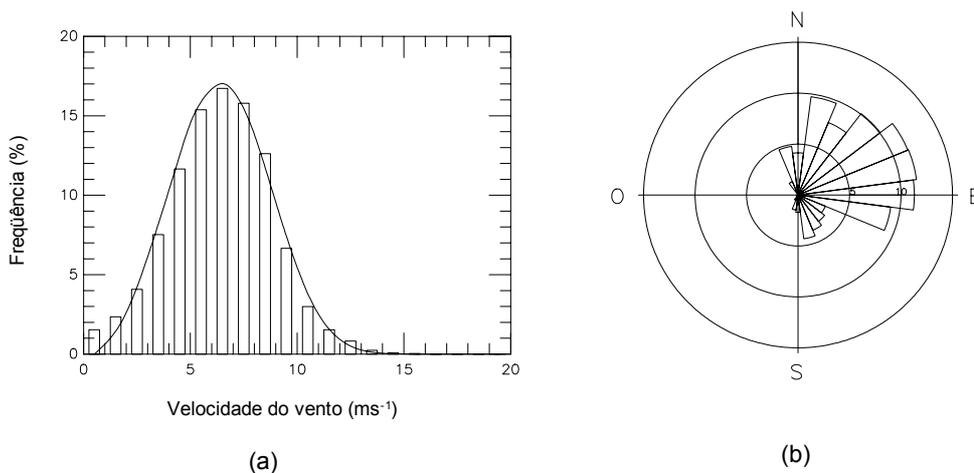


FIGURA 2.2 – (a) Histograma de velocidades; (b) Distribuição da direção do vento por setores de 15°.

2.2 Levantamento do Potencial Solar

A avaliação do potencial solar em qualquer região é realizada a partir dos dados de irradiação solar medidos por instrumentação adequada ou calculados através de modelos de estimativa clássicos. Na Ilha da Trindade não existem dados de energia solar coletados na superfície terrestre, no entanto, são obtidos dados por sensoriamento remoto através de satélite geoestacionário sob a responsabilidade da NASA. Tais dados medidos por satélite são aplicados em um modelo físico desenvolvido por PINKER & LASZLO (1992) cuja finalidade é estimar a irradiação solar incidente na superfície local.

Na Tabela 2.1, são apresentados os dados estimados de irradiação global na base temporal diária média mensal e média anual no plano horizontal. Tais valores são utilizados como base para os estudos da viabilidade técnica do sistema híbrido de geração

TABELA 2.2 – Dados da irradiação global diária média mensal e média anual no plano horizontal para as coordenadas geográficas da Ilha da Trindade. (fonte: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>)

Meses	Irradiação Solar Global (kWh/m ²)
Janeiro	7,840
Fevereiro	7,530
Março	6,560
Abril	5,660
Mai	4,640
Junho	4,230
Julho	4,370
Agosto	5,180
Setembro	5,840
Outubro	6,460
Novembro	6,870
Dezembro	7,220
Média Anual	6,03

Ainda nesta fase de avaliação do recurso solar é fundamental quantificar a irradiação global incidente no plano de inclinação dos painéis fotovoltaicos possibilitando, assim, o dimensionamento do sistema. Normalmente, a inclinação dos módulos é determinada pela latitude local adicionando de 5 a 10 graus, caso seja necessário maximizar a energia solar no período do inverno. Deve-se analisar, conjuntamente, o período crítico de demanda – período cujo consumo de energia será maior durante o ano – e o período crítico de insolação. Na Ilha da Trindade a demanda de carga é praticamente constante no decorrer do ano, portanto, a análise deverá ser conduzida em função apenas da variação do potencial solar de forma a maximizar o período crítico de insolação.

Adicionalmente, considerando a operação de um sistema híbrido com aproveitamento de duas fontes renováveis, torna-se importante, também, analisar a possibilidade de compensação do período crítico do potencial eólico. Desta forma, foram realizados cálculos da irradiação global, utilizando o modelo de estimativa para superfícies inclinadas de LIU & JORDAN (DUFFIE & BECKMAN,1998), para os três valores de inclinação citados, quais sejam, latitude, latitude + 5 graus e latitude + 10 graus.

As curvas representativas da irradiação global diária média mensal calculada no plano horizontal e nos planos inclinados são apresentadas na Figura 2.3.

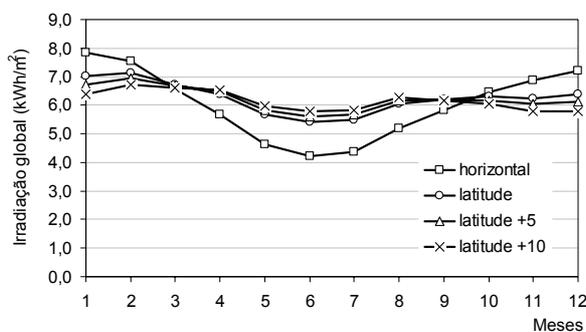


FIGURA 2.3 – Curvas da irradiação global diária média mensal para diferentes planos de inclinação.

Os resultados obtidos foram analisados, mensalmente, em conjunto com os dados de velocidade do vento.

Uma análise preliminar dos dados mensais de velocidade média do vento, mostrou que, ao longo do ano, o valor mais baixo ocorreu no mês de Março (5,15 m/s). Neste caso, para maximizar o período crítico do potencial eólico, os painéis fotovoltaicos foram dimensionados a partir da energia solar incidente no plano da latitude – cuja intensidade da irradiação global é maior no mês de Março.

Para a consolidação e a confirmação dos dados solarimétricos estimados, foi instalado em Agosto de 2006 um piranômetro, instrumento de medição da irradiação solar global, na área indicada para instalação do sistema fotovoltaico. Os dados medidos estão sendo armazenados e tratados para a formação de uma série histórica.

2.3 Levantamento da Curva de Carga Típica

A natureza da carga elétrica de um sistema descentralizado é de suma importância e é dependente da espécie e dos tipos de carga do local. Duas características devem ser observadas com atenção, a variabilidade e a qualidade de energia requerida. O dimensionamento do sistema deve levar em conta a correspondência entre a demanda requerida e o potencial energético disponível, verificando a necessidade de armazenamento e/ou o funcionamento do grupo gerador Diesel, atendendo, também, aos limites fixados de tensão e frequência para o adequado suprimento.

Existem três diferentes métodos para conhecer o perfil do consumo de energia de uma localidade:

- Coleta de informações da infra-estrutura local, ou seja, aparelhos instalados, períodos de utilização, hábitos dos consumidores, tipos e categorias dos mesmos. Este método possibilita uma estimativa do perfil de consumo do local.
- Medição de longo termo, ou seja, medição de toda a carga pelo período de um ano. Este método permite o conhecimento total do perfil de consumo com suas variações horárias, diárias, mensais e sazonais.
- Medição de pelo menos um mês de toda a carga. O perfil de consumo é bem definido no período de medição e o restante do ano pode ser extrapolado, formando uma base de dados estimada do perfil de carga anual.

Considerando que a Ilha apresenta, fora do período de abastecimento, um consumo praticamente constante ao longo dos dias, em virtude do número fixo de pessoas no local, da repetição das atividades diárias, da temperatura praticamente constante ao longo do ano - média em torno de 26°C -, portanto não necessitando de consumo de energia elétrica para aquecimento ou refrigeração, foi realizada a medição, durante um intervalo entre dois abastecimentos, ou seja, pelo prazo de dois meses. Esta medição foi efetuada por meio de um medidor de energia instalado no ramal de suprimento do gerador do quadro de distribuição e os parâmetros medidos foram armazenados e, em seguida, analisados, gerando a curva da Figura 2.4, onde se pode observar o valor máximo (média de 10min) em torno de 23kW às 19h. O valor de pico máximo instantâneo ocorreu às 18h atingindo 35,7kW.

Posteriormente estes dados foram extrapolados para todo o ano e foram utilizados nos cálculos dos valores nominais dos equipamentos e para simulações do sistema híbrido descentralizado, mesmo admitindo-se a possibilidade de ocorrência de alguma variação nos meses de inverno, devido ao provável uso mais intenso de chuveiros elétricos.

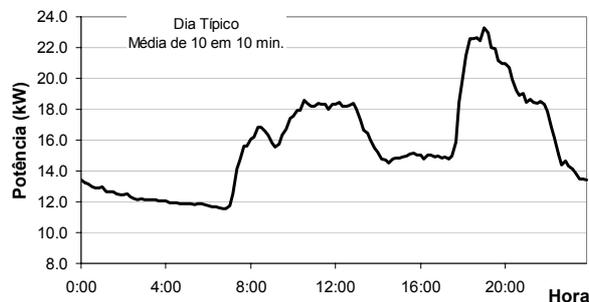


FIGURA 2.4 – Curva de Carga Típica da Ilha

3.0 - SIMULAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES PARA ANÁLISE COMPARATIVA

A partir do levantamento do potencial eólico e solar e, ainda, do levantamento da curva de carga típica da Ilha, tornou-se possível gerar diversas configurações do sistema híbrido para realização de estudos referentes à viabilidade técnica e econômica do projeto. Nesta etapa, foi utilizado um modelo computacional denominado HOMER, desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), o qual é capaz de simular dimensionamento e operação dos sistemas descentralizados de geração de energia (renováveis e não renováveis) para localidades remotas.

O dimensionamento dos sistemas fotovoltaico e eólico, assim como do sistema de armazenamento de energia, foi calculado para diferentes configurações que, por sua vez, foram associadas a parcelas distintas de participação das fontes renováveis, variando de 0 a 100%. Como o critério principal para o desenvolvimento do estudo trata-se da redução máxima do consumo de óleo Diesel no processo de geração de energia, a simulação inicial foi realizada a partir de um sistema híbrido utilizando apenas fontes renováveis para o atendimento global da Ilha. Em seguida, foram analisadas outras configurações que permitiram a operação parcial de um grupo gerador Diesel, de forma a atingir um valor mínimo de consumo de combustível, adequado ao suprimento energético da Ilha. Este parâmetro, uma vez estabelecido, tornou-se referência para simulação das outras configurações.

Na Tabela 3.1 estão relacionados os tipos de configurações dos sistemas híbridos que foram estabelecidos para a realização das simulações.

TABELA 3.1 – Tipos de configurações em estudo

Configuração	Sistema de Geração
1	Grupo Gerador Diesel / Gerador Eólico
2	Grupo Gerador Diesel / Gerador Fotovoltaico
3	Grupo Gerador Diesel / Gerador Eólico / Gerador Fotovoltaico

Na avaliação final do estudo, onde estão conjugados os critérios técnico, econômico e ambiental, foi selecionada a configuração mais adequada para o atendimento energético da Ilha da Trindade. Dentre as características principais levantadas na realização do processo comparativo das configurações estão:

- Potência instalada
- Custo total do investimento
- Emissão gerada de CO₂
- Emissão evitada de CO₂
- Área ocupada no polígono (área disponível para a instalação do sistema híbrido; representa cerca de 3,4% do total da área da Ilha).

Os valores referentes às emissões gerada e evitada de dióxido de carbono foram calculados de acordo com informações retiradas de documentos oficiais publicados pela *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UFCCC/CCNUCC .

4.0 - ANÁLISES COMPARATIVAS DAS CONFIGURAÇÕES

O principal objetivo do estudo é a redução máxima do consumo de óleo Diesel no processo de geração de energia elétrica. Para tanto, nas simulações iniciais realizadas, foi considerada apenas geração de energia renovável, ou seja, foi assumido consumo zero de óleo Diesel. Entretanto, os resultados obtidos apontaram inviabilidade técnica e econômica do sistema. Dessa forma, foram realizadas novas simulações permitindo a operação do grupo gerador Diesel e os resultados indicaram um valor mínimo de consumo, de aproximadamente 170 litros mensais, que se tornou referência para as configurações relatadas neste documento. É importante lembrar que o consumo atual de óleo Diesel da Ilha é cerca de 5.000 litros mensais. Apresenta-se, neste tópico, um resumo das características técnicas específicas de cada configuração estudada para a geração de energia elétrica na Ilha da Trindade, incluindo os custos associados para implantação das tecnologias em questão.

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são relacionados os dados técnicos característicos de cada configuração em estudo, além dos custos associados de implantação de cada sistema de geração. As configurações 1, 2 e 3 estão representadas por sistemas híbridos compostos por, respectivamente, geradores Diesel e eólico, geradores Diesel e fotovoltaico e geradores Diesel, eólico e fotovoltaico.

TABELA 4.1 – Dados característicos da configuração 1 representada por geradores Diesel e eólico

Dados Característicos da Configuração 1	
Potência Grupo Gerador Diesel	226kVA
Potência Gerador Eólico	300kW
Preço total da configuração	R\$4.340.000
Consumo de óleo	2.000 litros/ano
Emissão gerada CO ₂ (direta)	5,5 Toneladas/ano
Emissão evitada CO ₂ (direta)	164,5 Toneladas/ano
Área ocupada no polígono	51.840 m ²

TABELA 4.2 – Dados característicos da configuração 2 representada por geradores Diesel e fotovoltaico

Dados Característicos da Configuração 2	
Potência Grupo Gerador Diesel	226kVA
Potência Gerador FV	101kW
Preço total da configuração	R\$3.100.000
Consumo de óleo	2.000 litros/ano
Emissão gerada CO ₂ (direta)	5,5 Toneladas/ano
Emissão evitada CO ₂ (direta)	164,5 Toneladas/ano
Área ocupada no polígono	1.156 m ²

TABELA 4.3 – Dados característicos da configuração 3 representada por geradores Diesel, fotovoltaico e eólico

Dados Característicos da Configuração 3	
Potência Grupo Gerador Diesel	226kVA
Potência Gerador FV	41kW
Potência Gerador Eólico	70kW
Preço total da configuração	R\$2.970.000
Consumo de óleo	2.000 litros/ano
Emissão gerada CO ₂ (direta)	5,5 Toneladas/ano
Emissão evitada CO ₂ (direta)	164,5 Toneladas/ano
Área ocupada no polígono	29.400 m ²

Dentre as configurações dos sistemas híbridos estudadas, a configuração 3, cujo sistema é composto por fontes solar e eólica e geração Diesel, apresenta-se como a mais adequada para o atendimento energético da Ilha. O critério adotado para tal escolha leva em consideração fatores referentes ao impacto ambiental e aos custos de implantação dos sistemas.

É importante ressaltar que todos os estudos realizados para os sistemas híbridos partiram do valor de referência de 97% de redução do consumo de óleo Diesel (consumo de apenas 2.000 l/ano). Dentro deste contexto, a configuração 3 apresenta, em relação aos impactos ambientais, o menor valor de área de ocupação dos rotores dos aerogeradores, e, em relação aos custos, o menor valor associado à implantação das tecnologias.

5.0 - CONCLUSÃO

Na etapa inicial do desenvolvimento do estudo foi possível obter o levantamento dos recursos eólico e solar, através, respectivamente, de dados medidos por instrumentação adequada e dados estimados por modelos clássicos baseados em medidas de satélite.

Destaca-se, na Ilha da Trindade, a característica de complementaridade das fontes renováveis que, embora ocorra em menor grau - valores máximos de ambos os recursos acontecem em horários semelhantes - favorece a eficiência do sistema híbrido e a otimização dos custos. Os estudos indicam que os ventos permanecem presentes após o pôr-do-sol, fornecendo uma quantidade de energia indispensável para o sistema.

A parte referente ao sistema de geração por painéis fotovoltaicos foi limitada, sobretudo, pelos altos custos de implantação. Entretanto, sua participação na composição final do sistema híbrido tornou-se importante devido a grande potencialidade do recurso solar na região.

Em relação à geração eólica, além da delimitação geográfica do terreno a ser utilizado, o seu uso demasiado poderia interferir na fauna local, prejudicando o sobrevôo das aves, criando, assim, problemas de ordem ambiental. O potencial do recurso eólico local, associado aos custos mais baixos desse tipo de tecnologia, permitiu maior participação do sistema no resultado final da simulação.

Finalmente, em relação ao sistema de armazenamento foram considerados como fatores limitantes os custos e os impactos ambientais, estes últimos referentes ao descarte dos dispositivos. Portanto, foi estabelecido o uso de acumuladores com longa vida útil que, apesar de apresentarem preços mais altos, apresentam melhor relação custo benefício, uma vez que podem durar até 20 anos.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, será implementado um laboratório de pesquisas para novas aplicações de sistemas híbridos que possibilitem o atendimento energético de ilhas e comunidades isoladas no país. Este laboratório permitirá o desenvolvimento de estudos visando à redução do consumo do óleo Diesel em sistemas híbridos, através de algoritmos de controle, e possibilitará o dimensionamento desses sistemas em função do comportamento dos recursos renováveis de cada local. Os resultados destes estudos poderão apresentar uma contribuição efetiva aos programas de governo de universalização do setor elétrico e de preservação do meio ambiente

Os autores agradecem ao 1º Distrito Naval da Marinha do Brasil pelas informações e pelo apoio operacional prestados durante todo o período de execução do trabalho.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E., "Wind Energy Handbook" , John Wiley & Sons, LTD. 2001.

(2) PINKER, R.T., LASZLO, I., "Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale". *J. Appl. Meteorol.*, 31, 194, 1992.

(3) DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, 2006.