

BARCO SOLAR: EMBARCAÇÃO ELÉTRICA ALIMENTADA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Lucas Rafael do Nascimento – nascimento@emc.ufsc.br

Danilo Alberto Franco – daniлоfranco@emc.ufsc.br

Paulo Henrique Pfitscher – php.ufsc@gmail.com

Marília Carlini Freire – mariliacarlinif@gmail.com

Ricardo Rütther – ruther@mbox1.ufsc.br

Laboratório de Energia Solar - Universidade Federal de Santa Catarina

André de Almeida Sahlit – andre.sahlit@gmail.com

Paulo Lucas Figueiredo – cananeia_paulo@gmail.com

Orestes Estevam Alarcon – orestes@emc.ufsc.br

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo: Em novembro de 2009, com o intuito de participar do Desafio Solar Brasil, primeira competição nacional de barcos movidos à energia solar, foi construída a embarcação elétrica chamada “Vento Sul”. Este catamarã, de 6 metros de comprimento e 2,40 de largura, possui um único tripulante e é alimentado unicamente pela luz do sol. Este artigo descreve as características construtivas, além de apresentar, em detalhes, os aspectos elétricos e estratégicos que levaram a equipe a ser a primeira colocada na competição. Os testes realizados e os dados coletados durante a competição serão apresentados e uma maior utilização dos veículos elétricos no Brasil será discutida.

Palavras-chave: Energia Solar fotovoltaica, Embarcação Elétrica, Barco Solar.

1. INTRODUÇÃO

Embarcações com sistemas de propulsão elétricos alimentadas por energia solar fotovoltaica visam buscar alternativas ao consumo dos derivados de petróleo, principalmente o diesel, e se justificam por ser de fundamental importância do ponto de vista estratégico e até mesmo de soberania nacional. Além disso, apresentam rendimento satisfatório em diversos tipos de embarcações (Loois, 1994), além dos benefícios indiscutíveis no que diz respeito quanto às reduções dos impactos ambientais (Katagi, 1996).

Os veículos elétricos precederam os veículos baseados em motores de combustão interna. Porém, por quase um século, estes últimos dominam plenamente o mercado mundial. Ultimamente, devido ao aquecimento global e ao crescente aumento dos custos de combustíveis fósseis, veículos que utilizam na sua propulsão motores elétricos passaram novamente a ganhar importância.

O barco elétrico alimentado por energia solar fotovoltaica, desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), começou a ser projetado no ano de 2009 após o convite da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) à participação do Desafio Solar Brasil, competição nacional de barcos movidos à energia solar. A embarcação foi construída com o objetivo específico de participar no evento mencionado, o que acarretou restrições no projeto, decorrentes de uma necessária adequação ao regulamento da competição

O Desafio Solar Brasil é um “rali” de barcos movidos à energia solar, e visa divulgar o potencial desta tecnologia aplicada à embarcações de serviço, recreio e transporte de passageiros. Sua primeira etapa foi realizada em outubro de 2009 na cidade litorânea de Paraty (Rio de Janeiro – Brasil). Dividida em 7 regatas mais um prólogo, os percursos eram traçados a partir de contornos de ilhas ou bóias, com duração máxima de 8 horas cada.

A competição nacional foi inspirada no Frisian Solar Challenge, competição realizada a cada dois anos na Holanda, principal evento europeu para embarcações solares. Durante o evento, os participantes percorrem 220 quilômetros em canais de 11 cidades da região da Frísia, no norte do país. Com regras semelhantes ao desafio internacional a competição brasileira possui algumas limitações quanto ao banco de baterias, limitado à 1kWh, além de potência máxima do gerador fotovoltaico de 780Wp e dois cascos de catamarã cedidos pela organização do evento.

2. PROJETO DA EMBARCAÇÃO

2.1 Projeto Mecânico

O catamarã utilizado no Desafio Solar Brasil teve seus cascos projetados e confeccionados no pólo náutico da UFRJ, e cedidos às demais equipes participantes. A escolha deste tipo de casco foi decorrente de sua maior estabilidade, se comparado a embarcações do tipo monocasco e ao fato de não sofrerem desaceleração ao furar ondas (Migueis,

2005), características estas de grande relevância, visto que os percursos onde foram realizadas as regatas apresentavam muitas ondulações.

Os dois cascos foram laminados com malhas de fibra de vidro e resina epóxi, em seus anteparos foram utilizadas placas de divynycell que foram laminadas à estrutura. Para realizar a união entre os flutuadores e dar suporte à estrutura dos módulos fotovoltaicos foram utilizados tubos em aço inox, que repousavam sobre duas camas laminadas em fibra de carbono e presas aos cascos através de fixadores também em aço inox. Na Fig. 1A é possível observar o anteprojeto da embarcação que possui dimensões de 6 m de comprimento e 2,40 m de largura.

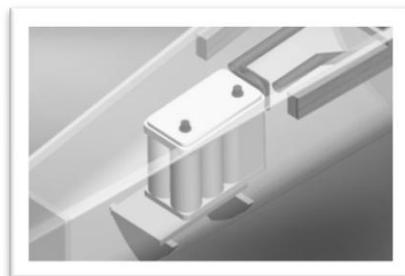
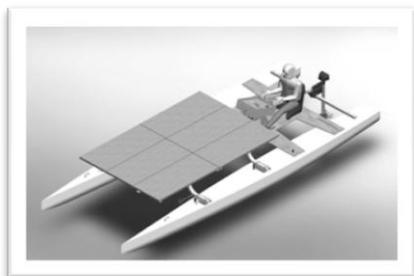


Figura 1A - Anteprojeto do barco em 3D.

Figura 1B – Sistemas de controle e aquisição de dados da embarcação.

Figura 1C – Compartimento da bateria.

A estrutura que sustenta o piloto e o painel que contém os principais equipamentos eletrônicos podem ser vistos na Fig. 1B, estas estruturas foram construídas em compensado naval, composto de lâminas de madeira sobrepostas em sentido alternado coladas entre si com resina de cola branca. Esta madeira é largamente utilizada em embarcações, pois possui excelente resistência mecânica e confere proteção à água e umidade.

As estruturas metálicas que unem os módulos fotovoltaicos e também que prendem o motor à embarcação foram confeccionadas com perfis de alumínio. Além de extremamente leve e com boa propriedade mecânica, o alumínio é um material durável e resistente à corrosão.

2.2 Projeto Elétrico

O sistema elétrico do barco pode ser dividido em cinco grupos: gerador fotovoltaico, banco de baterias, motores elétricos, central de controle e sistema de emergência.

O gerador fotovoltaico é a única fonte de energia do barco, o painel é composto por seis módulos fotovoltaicos Kyocera KC130TM de potência nominal de 130 Wp totalizando 780 Wp. Os módulos fotovoltaicos foram doados pela organização do evento de modo a todo participante da competição possuir a mesma potência instalada em suas embarcações.

O banco de baterias também é limitado pela organização do evento sendo que a energia máxima que pode ser armazenada não pode exceder 1 kWh. Este pulmão energético é composto por duas baterias chumbo-ácido, modelo Optima Yellow Top D51, com capacidade de 41 Ah cada, totalizando 82 Ah. As baterias Optima Yellow Top são baterias de ciclo profundo para aplicações tracionárias e estacionárias. As baterias possuem suas células montadas em espiral, possibilitando maior superfície e menor espaçamento entre placas, o que resulta em uma resistência interna mais baixa e tempo de carregamento reduzido. Outro fator que levou à escolha desta bateria foi a garantia de seu fabricante de que, mesmo com seu invólucro danificado, não há risco de vazamento de solução ácida (OPTIMA, 2010). Ressalta-se que a escolha pela tecnologia chumbo-ácido deu-se, também, devido ao baixo custo e alta disponibilidade no mercado, confiabilidade e desempenho satisfatórios que as baterias apresentam e de seu uso em veículos elétricos ser bastante difundido (Linden, 2001).

A Fig. 1C mostra o banco de baterias que está posicionado na parte frontal do barco, estando localizada uma bateria em cada flutuador. As baterias estão em caixas estanques, que possuem um sistema de ventilação com dois ventiladores, um para cada caixa.

A idéia inicial para compor o sistema de propulsão do barco era a aquisição de um motor de corrente contínua com alta eficiência e em sequência o projeto e construção de um sistema de controle de velocidade otimizado para uma embarcação elétrica, assim como o projeto de hélices adequadas ao motor e a embarcação. Porém, colocar esta idéia em prática implicaria em um complexo projeto naval incluindo um sistema de transmissão e adequação das hélices existentes no mercado ou então o projeto e construção de novas hélices visando à aplicação em questão.

Em virtude de a equipe não contar com nenhum estudante ou professor que pudesse se dedicar aos projetos náuticos descritos acima em um curto período de tempo, foi adotada a opção de utilizar-se o motor fora de bordo, o que eliminaria as perdas por transmissão e o próprio motor já traria a hélice ótima para seus níveis de torque e velocidade.

Os motores escolhidos são fabricados pela empresa alemã Torqeedo GmbH, que se dedica à fabricação de motores elétricos fora de bordo para barcos, os quais se destacam em comparação com a maior parte dos motores elétricos fora de bordo fabricados no mundo (Manley, 2007) (Schmidt, 2007).

Os níveis de eficiência global (conjunto de motor, transmissão e hélice) dos motores escolhidos alcançavam a faixa de 44% (Torqueado, 2010), o dobro do que qualquer motor vendido no mercado nacional alcança atualmente. A tecnologia empregada nos motores de corrente contínua de imã permanente e sem escovas para comutação, os tornam mais eficientes que as máquinas em corrente contínua convencionais, pois o imã permanente substitui o enrolamento de campo na criação dos campos magnéticos na máquina, enquanto a retirada das escovas diminui consideravelmente as perdas relacionadas à comutação (Fitzgerald, 2006).

A adequação de potência do motor à embarcação foi realizada através de cálculos hidrodinâmicos, utilizando os coeficientes de resistência ao avanço fornecidos pelos fabricantes dos mesmos (Pólo Náutico da UFRJ). O método utilizado foi o Slender Body, utilizando como referência que os cascos estariam a 15 cm abaixo da linha de água, ou seja, calado igual a 0,15 m. Para efeito de cálculo considera-se, também, velocidade da água e do vento iguais a zero.

Observa-se na curva da Fig. 2 que, para que a velocidade aumente de 9 nós para 10 nós, a potência necessária é de aproximadamente 300 W. Percebe-se que para que a velocidade aumente apenas 1 nó, a potência necessária é cada vez maior, e esta potência sobe exponencialmente à medida em que deseja-se um aumento de velocidade. Com isto limitou-se em 0,8 kW a potência total para os motores elétricos, divididas entre dois motores de 400 W modelo Torqueado Travel 401 S, com seus respectivos controles de velocidade.

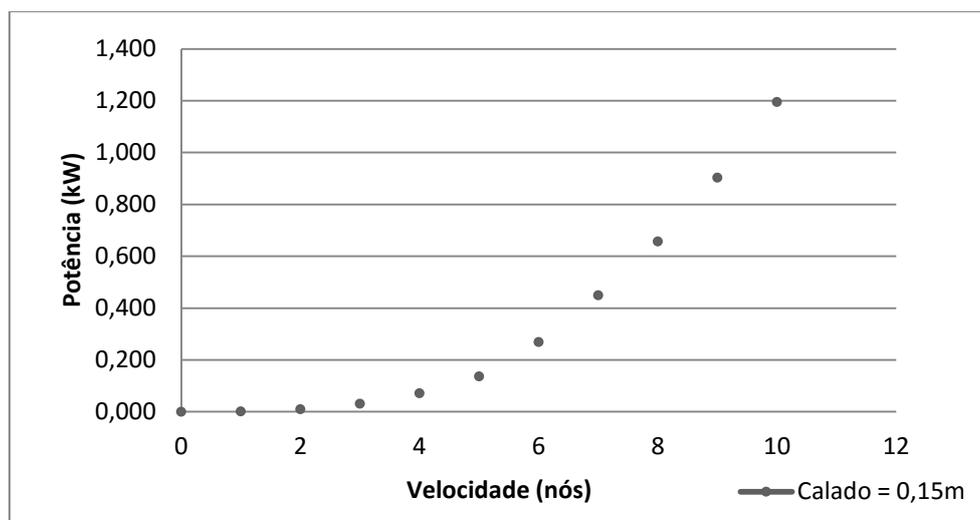


Figura 2 - Potência demandada pelos propulsores versus velocidade da embarcação

A embarcação também conta com uma central de controle, e nela estão instalados equipamentos como controlador de carga, monitorador de bateria, sistema de proteção do piloto (*Dead man's switch*), sistema de telemetria, chaves seccionadoras e as principais conexões elétricas do barco.

Para evitar sobrecarga e/ou descarga excessiva das baterias é preciso gerenciar o controle de carga destes acumuladores. Controladores de carga têm esta função, podendo ser encontrados no mercado duas principais topologias de controladores, os que possuem estratégia de controle por modulação por largura de pulso (PWM) e os com buscador de ponto de máxima potência (MPPT).

O ganho em eficiência que pode ser alcançado utilizando um dispositivo com MPPT é difícil de ser estimado, pois pode sofrer grandes variações devido à fatores como temperatura e configuração dos sistemas. Fabricantes deste tipo de aparelho apontam que este ganho encontra-se entre 30% e 40%, no entanto, acredita-se que o ganho está na faixa de 10% a 15%, com a vantagem adicional de se elevar a tensão de trabalho entre módulo fotovoltaico e controlador de carga, o que diminui as perdas por queda de tensão nos condutores (PHOTON, 2008).

Um fator importante no dimensionamento e escolha dos equipamentos para o barco solar foi a eficiência dos mesmos. As perdas deveriam ser reduzidas ao máximo haja vista o caráter de competição. O controlador utilizado na embarcação foi o de modelo FLEXmax 60 do fabricante OutBack, dotado de tecnologia MPPT. No período em que o barco foi projetado este era o controlador de melhor desempenho no mercado atingindo 98,1% de máxima eficiência.

É extremamente importante observar as reservas de energia da embarcação, à medida que se utiliza mais energia que aquela fornecida pelo sol em determinado momento, o excedente de energia sai do banco de baterias. A função essencial do monitorador de bateria é medir a energia retirada pela carga e, através deste dado, calcular a energia remanescente nesta.

A Fig. 3 permite visualizar a dinâmica de informações que é trocada entre a embarcação e a equipe de terra. Todos os dados enviados via GPRS para a equipe de terra são confrontados com as previsões feitas antes do início da prova. Toda alteração no planejamento da prova é informada ao navegador que realiza as compensações e mudanças necessárias.

O monitorador também fornece outros dados como, por exemplo, a tensão da bateria e corrente que está sendo drenada ou carregada, e também o tempo disponível para que toda a energia dos acumuladores se esgote. Este último é baseado na característica da bateria, sendo inversamente proporcional à corrente consumida pela carga.

Este equipamento é muito útil no barco, possibilitando ao navegador saber qual potência poderá ser utilizada nos motores para que seja possível terminar as provas, reduzindo o risco da bateria se esgotar no meio do percurso.

Um grande diferencial da equipe Vento Sul – UFSC, foi a aquisição de dados em tempo real. A embarcação possui um módulo de transmissão de dados, fornecido pela empresa apoiadora da equipe V2COM, que informa dados de consumo dos motores e geração de energia do gerador fotovoltaico.

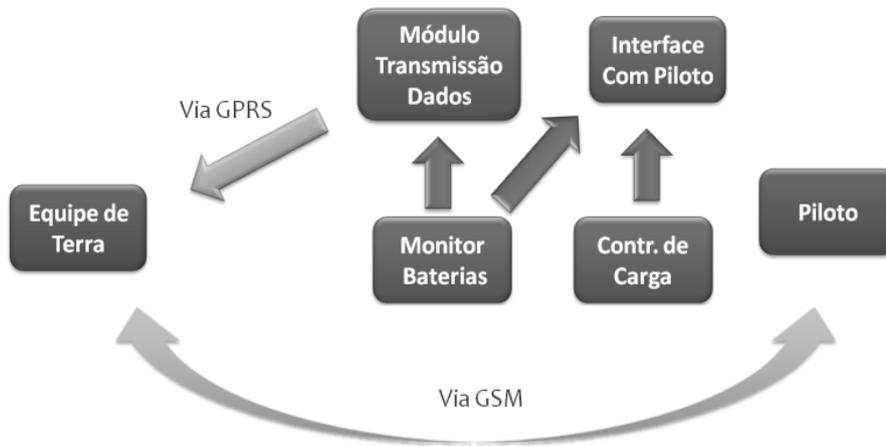


Figura 3 – Diagrama de blocos da troca de informações entre embarcação e equipe de terra

A Fig. 4 ilustra o fluxograma de tomada de decisão da equipe de modo a prever a descarga máxima do banco de baterias para um dia de prova.

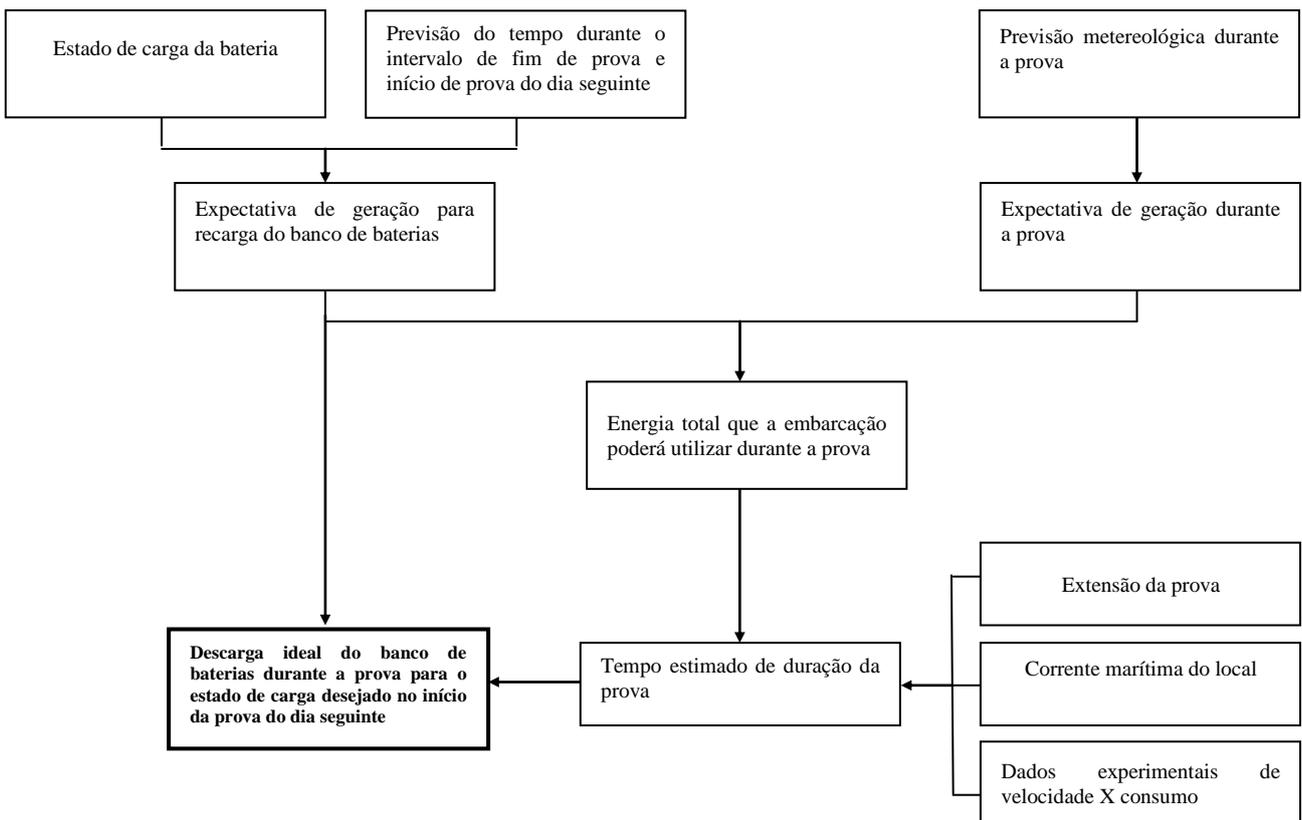


Figura 4 – Fluxograma de tomada de decisão para identificar a máxima descarga diária aceitável no banco de baterias

O barco, além de todo sistema principal já acima descrito, também possui um sistema de emergência, composto por duas bombas de porão, uma em cada casco, com capacidade de bombeamento de 750 litros por hora. Caso ocorra algum vazamento de água para dentro dos cascos, as bombas operam automaticamente retirando a água. Caso o navegador caia para fora do barco o dispositivo *Dead man's switch* (DMS), que conecta o navegador ao barco por meio de um plugue mecânico, desliga o sistema elétrico da embarcação. Todo o sistema elétrico do barco é exposto na Fig. 5.

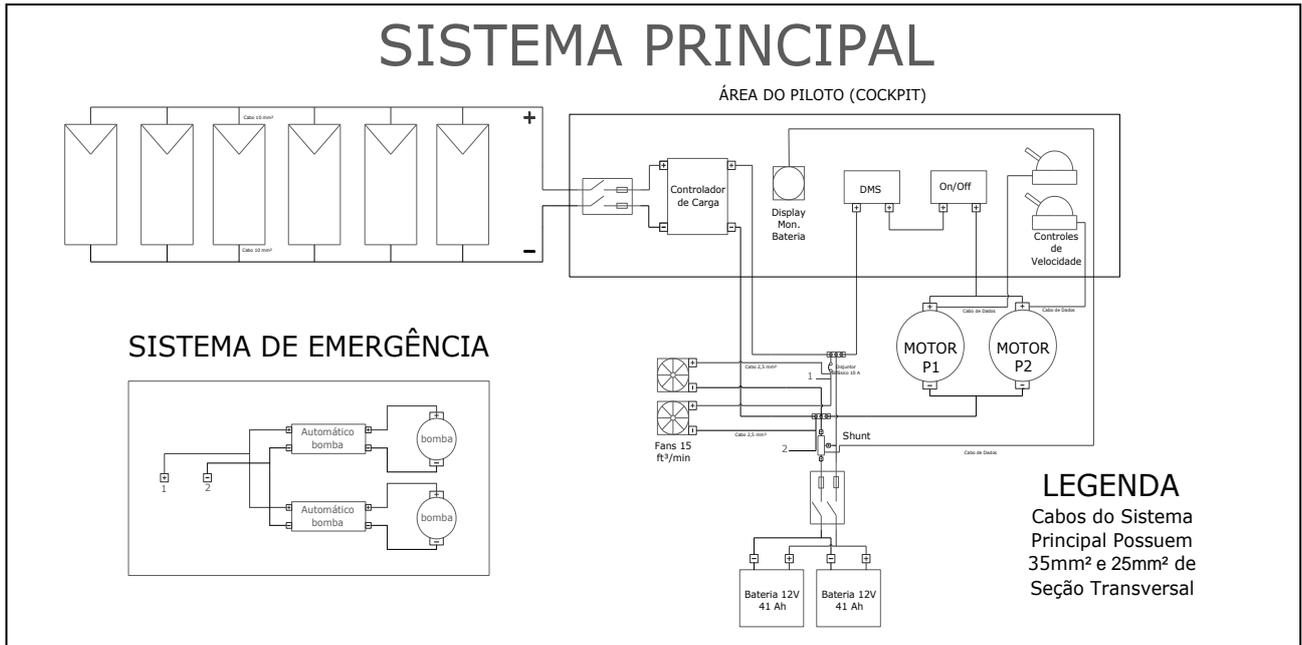


Figura 5 – Diagrama elétrico da embarcação Vento Sul

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar da pouca experiência naval, a equipe Vento Sul - UFSC ficou em 1º lugar na classificação geral, 40 minutos à frente do segundo colocado. Esta vitória garantiu a classificação para o desafio mundial para o qual a equipe já se prepara.

As demais equipes participantes do Desafio Solar Brasil possuíam grande experiência na área naval, porém a falta de conhecimento em veículos elétricos e na energia solar fotovoltaica ficaram evidentes ao longo da competição. Exemplos foram participantes que tiveram dificuldade na conexão dos módulos fotovoltaicos, danos ao banco baterias e queima de controladores de carga; outros ainda, devido a mal dimensionamento da fiação, tinham sua instalação elétrica comprometida.

Como descrito anteriormente, o barco Vento Sul foi dotado de equipamentos que permitiam à equipe de terra receber os dados elétricos em tempo real. A partir destes dados alguns gráficos puderam ser gerados. Na Fig. 6, pode-se observar como a tensão do banco de baterias se comporta à medida que a corrente é drenada durante um período de aproximadamente 2 horas. Nota-se neste gráfico que a corrente não foi controlada, atingindo elevados picos de descarga que claramente se refletem em vales de tensão.

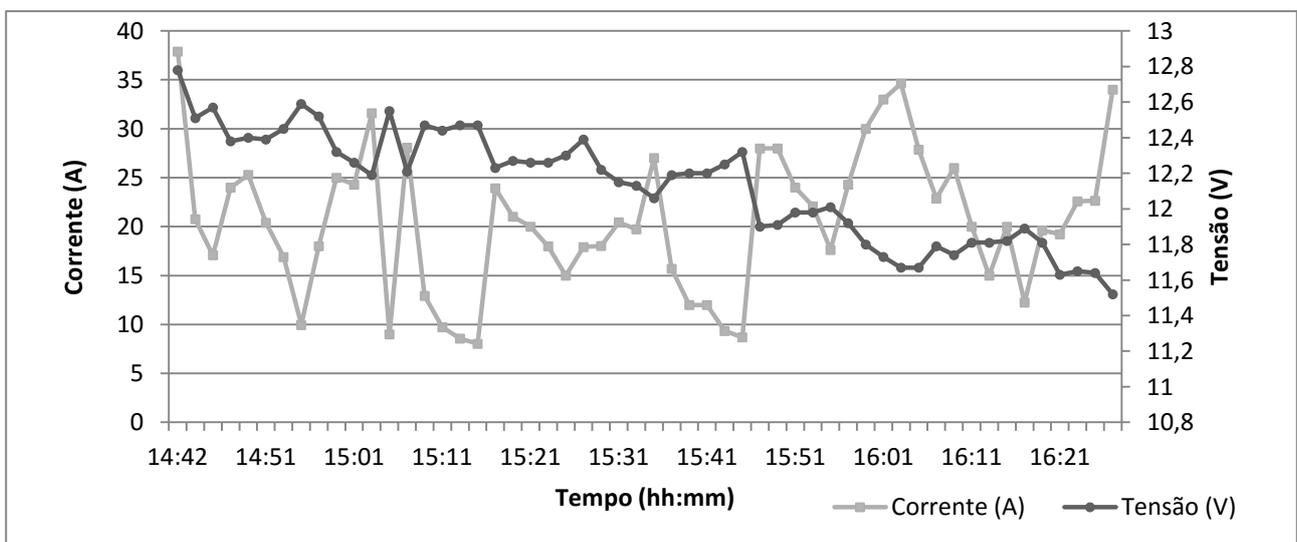


Figura 6 - Corrente e tensão durante a descarga das baterias

A Fig. 7 mostra a carga (valores negativos) e a descarga das baterias, assim como o comportamento da tensão do banco de baterias à medida que a corrente é injetada ou drenada do mesmo.

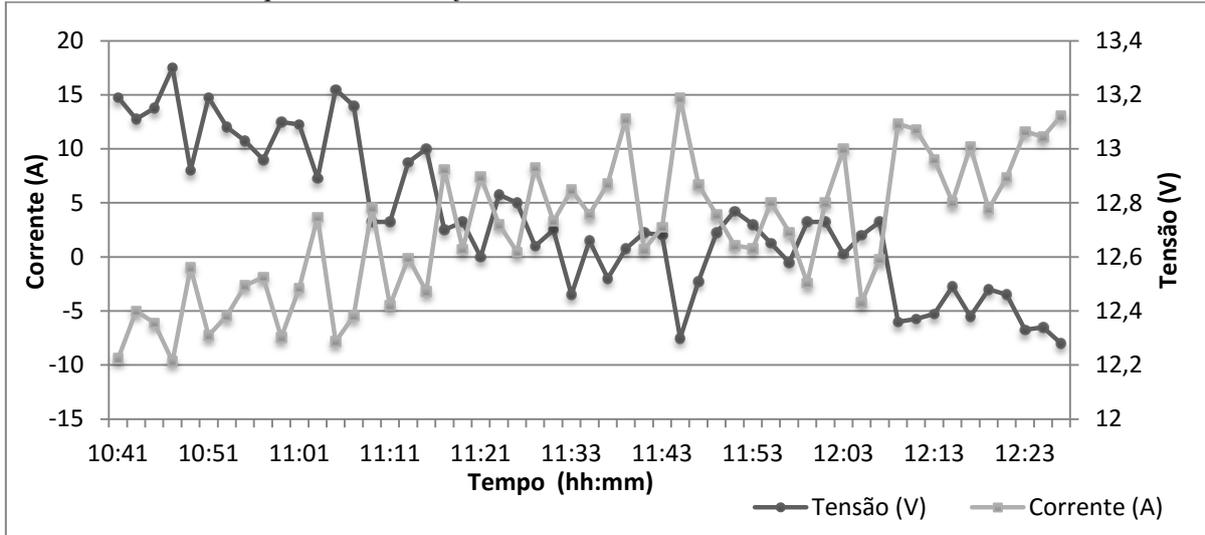


Figura 7 - Corrente e tensão durante a carga e descarga das baterias

A Fig. 8 relaciona a corrente de descarga das baterias, a corrente drenada dos módulos fotovoltaicos e a velocidade em nós do barco em relação à terra, medida com auxílio de um dispositivo SIG. Neste gráfico, que representa o primeiro dia de competição, a corrente inicial máxima estimada para o banco de baterias foi de 5 A. Pode-se observar que próximo das 14:30h uma ultrapassagem foi realizada, resultando em um pico de corrente acima do estimado. As 15:00h uma nova previsão de tempo foi inserida no fluxograma de tomada de decisão, levando a uma nova descarga máxima admitida de 12 A. Cabe ressaltar que nem sempre um aumento na corrente total injetada no motor representa em aumento de velocidade do barco em relação à terra. Entre o período das 15:20h até aproximadamente 15:40h, é possível notar fortes correntes marítimas encontradas no decorrer do percurso.

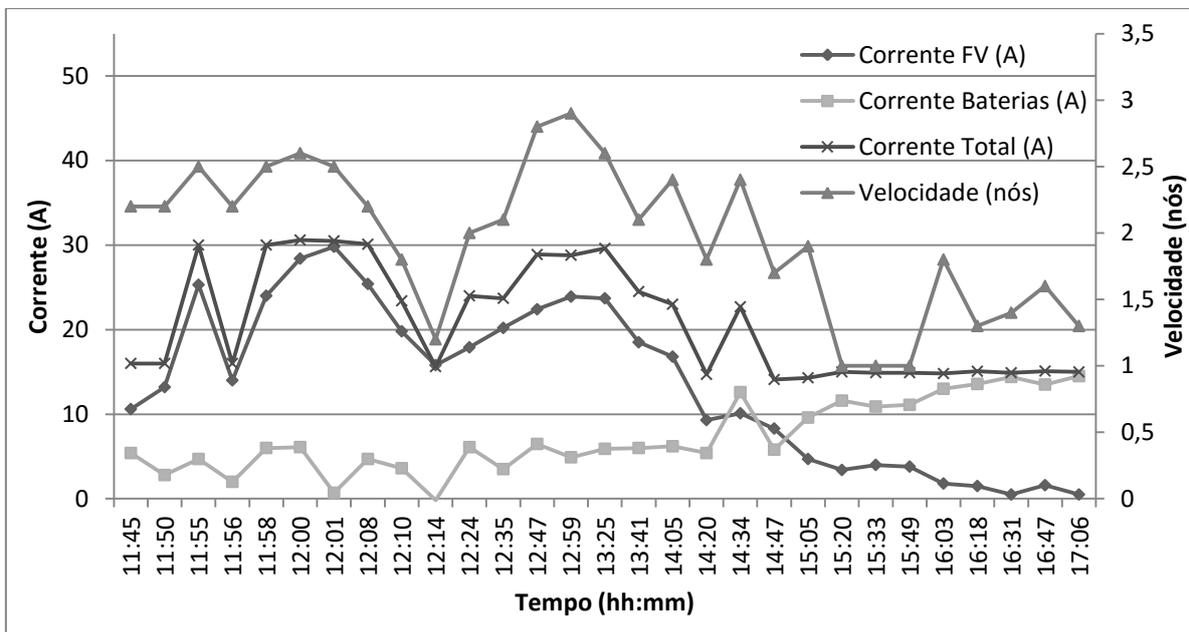


Figura 8 – Corrente do gerador fotovoltaico, corrente das baterias e velocidade do barco

4. CONCLUSÃO

A utilização da energia solar fotovoltaica aplicada a veículos elétricos vem crescendo rapidamente em diversos países. No Brasil, apesar do elevado potencial de irradiação solar, esta tecnologia ainda não é muito empregada, geralmente pelo desconhecimento de suas potencialidades. Eventos como o Desafio Solar Brasil têm como objetivo estimular o uso da energia solar fotovoltaica, mostrando sua viabilidade como fonte de energia limpa e renovável.

A estratégia de gerenciamento de carga da bateria aliada a um sofisticado sistema de aquisição de dados foi essencial para a vitória da equipe que pretende aprimorar os sistemas para participar do campeonato mundial que acontecerá na Holanda em julho de 2010.



Figura 9 – Barco solar Vento Sul nas águas de Paraty - RJ

O barco movido à energia solar, que pode ser visto na Fig. 9, em sua construção final, se mostrou uma opção adequada para o transporte hidroviário, pois utiliza a energia praticamente inesgotável do sol como fonte energética, é silencioso, possui elevada eficiência e baixo consumo se comparado a um mesmo barco a óleo diesel. Com o aumento da escala de produção e com maior número de embarcações piloto, sua viabilidade econômica e técnica serão demonstradas.

Sabe-se que o Brasil possui grande carência no setor industrial de maquinários que possuam alto valor agregado e que a maior parcela das exportações se concentra em produtos agrícolas e matérias primas como ferro e aço. No entanto, existem no Brasil grandes fábricas de motores elétricos, algumas delas crescendo e se expandindo cada vez mais em escala global, porém esquecendo-se de observar um nicho que cresce a cada dia em todo o planeta, o de motores elétricos de corrente contínua de baixa potência, mais especificamente para aplicações em veículos elétricos.

Pode-se afirmar que não existe no mercado nacional nenhum fabricante de máquinas CC de imã permanente, que seriam ideais para aplicação veicular por apresentar alta eficiência na conversão eletromecânica e também por não requerer inversores de frequência já que os acumuladores e módulos fotovoltaicos fornecem energia também em corrente contínua. A falha nesse ponto se dá de forma generalizada. Apesar de não se encontrar nenhuma matéria sobre sustentabilidade que não aponte para a dupla energia renovável e veículo elétrico, ainda existem grandes barreiras para que o segundo consiga se expandir no Brasil, a começar pelo IPI incidente sobre veículos elétricos, que é de 25% para carros e 35% para motos (Receita Federal, 2010). Tem-se, até agora, o projeto de lei nº 44 de 2009 que prevê a isenção do IPI sobre veículos elétricos durante dez anos, este ainda segue tramitação no senado, porém ainda sem previsão de ser aprovado (Senado Federal, 2010).

Ressalta-se, portanto, a dificuldade da obtenção de grande parte destes equipamentos em território nacional, e registra-se que veículos elétricos podem ser ótimas soluções para aplicações que vão além do transporte hidroviário. Cabe ressaltar, ainda, que muito pouco tem sido feito para que esta nova concepção em transporte se torne parte do cotidiano dos brasileiros.

Agradecimentos

A Equipe Vento Sul UFSC agradece a todos aqueles que tornaram possível o projeto e construção de sua primeira embarcação movida exclusivamente à energia solar, o Vento Sul. A equipe agradece, também, ao patrocínio gentilmente cedido pela Tractebel Energia GDF Suez e os apoiadores V2COM e Baterias OPTIMA.

REFERÊNCIAS

- Fitzgerald, A. E. ; Kingsley Jr., Charles ; UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência. Tradução de Anatólio Laschuk. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2006. P. 350-376.
- Katagi, T.; Fujii, Y.; Nishikawa, E.; Hashimoto, T.; Ishida, K.; Photovoltaic Generating System on Ships to Reduce Fossil Fuel Dependence. 1996.
- Linden, David; Reddy, Thomas B. Handbook of Batteries. 3ª Edição. Nova Iorque: Mcgraw-Hill, 2001. p. 23.1-23.54.

- Loois, G.; Wouters, F.P.H.; Koerts, G.M.; van der Weiden, T.C.J.; Monitoring Results of PV for Electric Propulsion on Recreational Boats. 1994.
- Manley, Pet; ABECASIS, John. PBO Test: Our Friends Electric, Practical Boat Owner, Reino Unido, Nº 488, p. 118-121, Agosto. 2007.
- Migueis, Ronaldo José Fazanelli. Aspectos estruturais da mastreação, transversais e casco de catamarans a vela day charter. 2005.
- OPTIMA Batteries, OPTIMA Product Information, Estados Unidos, Disponível em <http://www.optimabatteries.com/product_support/faqs.php#productInformation> Acesso em: 15/04/2010.
- PHOTON International, Seeking the power peak: Market survey on charge controllers, Alemanha, p. 114-129, Janeiro. 2008.
- Receita Federal, BRASIL. TIPI Seção XVII. Cap. 87, NCM 8703.33.90, NCM 8703.90.00, NCM 8711.90.00. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/Aliquotas/DownloadArqTIPI.htm>> Acesso em: 20/04/2010.
- Schmidt, Olaf. Test E-Motoren: Leise Alternativen, Yacht, Alemanha, Nº 23, p. 79-83, Agosto. 2007.
- Senado Federal, BRASIL. PLS, Projeto de Lei do Senado. Nº 44 de 2009. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/sf/atividade/materia/detalhes.asp?p_cod_mate=89535&p_sort=DESC&cmd=sort> Acesso em: 20/04/2010.
- Torqueedo GmbH, Torqueedo Catalogue 2010, Alemanha, Disponível em <http://www.torqueedo.com/uploads/media/TQ_Katalog2010_E_metr_kl_01.pdf> Acesso em: 15/04/2010.

Abstract: *In November of 2009 with the intention of participating in the Brazilian Solar Challenge, the first national competition of boats powered by solar energy, the electric boat called Vento Sul was constructed. This catamaran, 6 meters in length and 2,40 meters in width, has only one crew member and is fed exclusively by sunlight. This article, describes the construction techniques, in addition to the details of the energy management strategies aspects that have led the team to be champion of the competition. The tests that were carried out and the data collected during the competition are presented and a case is made for a more widespread use of electric vehicles in Brazil.*

Key words: *Photovoltaic Energy, Electric Boat, Solar Boat*