

Monitoring a hydrokinetic converter system for remaining energy in hydropower plants

Rafael C. F. Mendes, Ramsay R. Mac Donald, Ana Rafaela S. Miranda, Rudi H van Els, Maurício A. Nunes and Antonio C. P. Brasil Jr.

Abstract—The aim of the present paper is to discuss the monitoring strategies for a modular hydrokinetic turbine system. A floating triangular-frame arrangement of three propeller hydrokinetic turbines is installed in the outflow channel of a hydropower plant, in the interest of remaining water stream energy conversion. The monitoring techniques based on Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT) are reported, taking into account the specific framework of the instrumentation and data management in field experiments.

Index Terms—Hydrokinetic turbines, Wireless sensor networks, Internet of Things, instrumentation, system monitoring, graphical user interface.

I. INTRODUÇÃO

As fontes energéticas associadas às correntes marinhas ou fluviais podem representar uma maneira alternativa de produzir eletricidade a partir da energia cinética contida nas correntes naturais de água, conhecida também como energia *hidrocinética*. Os sistemas de conversão de energia hidrocinética têm sido considerados uma importante e emergente tecnologia de geração renovável de eletricidade.

A tecnologia de conversão energia hidrocinética é um foco real de muitos projetos mundiais de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e algumas análises recentes exploraram seu potencial [1], [2]. Inovações tecnológicas foram relatadas a respeito do desenvolvimento de modelos pequenos e grandes de turbinas hidrocinéticas, com aplicações para marés [3] ou correntes de rios [4]. Consolida-se um presente status da inovação tecnológica, com a base de uma tecnologia robusta e sustentável.

O uso de turbinas hidrocinéticas nas correntes fluviais é particularmente interessante para promover a sustentabilidade local da geração descentralizada de eletricidade nas áreas ribeirinhas [5], [6]. Nessas situações, turbinas de pequeno ou médio porte, alinhadas à corrente principal, podem ser empregadas para converter a energia cinética disponível nas seções transversais do rio. Esses dispositivos podem ser instalados com baixo impacto ambiental e com compatibilidade com a navegação fluvial local.

Por outro lado, uma alternativa de local atraente para instalação de turbinas hidrocinéticas é o reservatório a jusante de uma usina hidrelétrica tradicional já existente (e.g. [7], [8] e [9]). A energia remanescente de uma usina hidrelétrica está disponível na forma de energia hidrocinética no canal de saída,

em que a velocidade do canal é consequência do fluxo de água emitido pelas turbinas, adicionado ao escoamento vertido. Sendo assim, um conjunto de turbinas hidrocinéticas instaladas no canal de saída pode ser utilizado para converter esta de energia remanescente, compartilhando a mesma infraestrutura de despacho de energia já existente na usina hidrelétrica.

Algumas questões técnicas relevantes, relacionadas à instalação de conversores hidrocinéticos nessa situação específica, devem ser destacadas. Em primeiro lugar, o canal de saída de uma unidade hidrelétrica geralmente é muito turbulento e ondulado, principalmente quando o vertedouro está em operação. A segunda dificuldade é que, em geral, para grandes unidades hidrelétricas, o canal tem centenas de metros de largura. Portanto, o despacho de eletricidade e o sistema de instrumentação devem ser robustos o suficiente para vincular os sistemas embarcados (energia e instrumentação) aos quadros localizados nas margens terrestres. As restrições são bastante semelhantes aos sistemas de marés, se a usina hidrelétrica possuir um reservatório com grandes dimensões.

O presente artigo explora o conceito de operação de um conversor de energia hidrocinética no canal de saída de uma usina hidrelétrica. O sistema de monitoramento para um módulo de três turbinas hidrocinéticas será discutido, relatando experimentos *in situ* de uma unidade instalada. A organização do trabalho foi feita da seguinte forma: na segunda seção, é apresentado o sistema modular de turbinas hidrocinéticas. Na seção três, são discutidas a arquitetura do sistema de monitoramento e a escolha de sensores e dispositivos eletrônicos. Na última seção, os resultados de dois testes de campo diferentes são apresentados em discussões críticas sobre os desafios do monitoramento desse tipo de dispositivo conversor de energia.

II. TURBINA HIDROCINÉTICA

O presente estudo é baseado em um sistema modular que emprega turbinas hidrocinéticas com rotores de quatro pás chamado HK-10, conforme apresentado na Fig. 1a. Esta máquina, com 2,2 m de diâmetro, tem uma potência nominal de 10 kW a uma velocidade de corrente de água de 2,5 m/s (conforme descrito em [10], [11]). Três turbinas são projetadas para operar em uma plataforma flutuante de estrutura triangular (ver Fig. 1b e 1c), podendo também compor uma variedade de máquinas operando juntas (por exemplo, [5]). O Laboratório de Energia e Meio Ambiente (LEA), da Universidade de Brasília, realizou o projeto hidrodinâmico e mecânico da máquina com a colaboração de um grupo de parceiros de P&D. O principal objetivo do desenvolvimento do sistema conversor de energia hidrocinética é obter uma tecnologia

R.C.F. Mendes, R. MacDonald, A.R.M. Miranda, R. van Els and A.C.P. Brasil Jr. were with the Laboratory of Energy and Environment, University of Brasília, Brasília, DF, 70710-900 Brazil e-mail: rafael.cfmendes@gmail.com.

M. A. Nunes was with AES Tietê S/A. Av. Nações Unidas, 17. Bauru. São Paulo. Brazil.

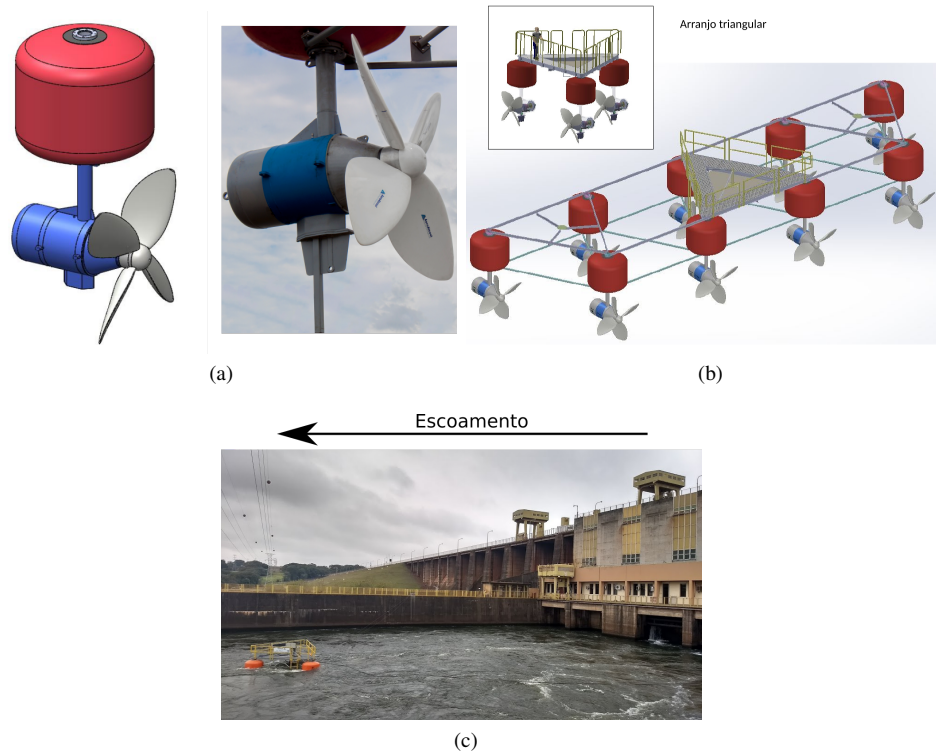


Fig. 1. Turbina hidrocínética HK10 ($10kW @ 2.5m/s$). (a) Máquina individual (b) Arranjo triangular e sua plataforma (c) Arranjo triangular operando no teste na UHE de Bariri (Rio Tiete - Brasil).

sustentável para fornecer energia a pequenas comunidades remotas ou recuperar o potencial energético restante na jusante das usinas hidrelétricas. O aspecto modular do sistema permite a adaptação do grupo de turbinas, considerando os requisitos locais da demanda de energia.

Assim como todos os sistemas de geração, principalmente os remotos [12], os conversores hidrocínéticos também necessitam de uma estrutura de monitoramento robusta capaz de operar com total autonomia, garantindo o mínimo de interrupções. Desta forma, visando aumentar a confiabilidade, a implementação de redes de sensores sem fio (*WSN-Wireless Sensor Networks*) é notável em situações de monitoramento em plataformas aquáticas [13]. Cabendo ressaltar a importância da escolha de um protocolo no contexto de Internet das Coisas (IoT) capaz de permitir a comunicação, a análise e a reconfigurabilidade dos sistemas de monitoramento [14].

III. ARQUITETURA DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

O sistema de monitoramento usado neste projeto foi uma plataforma de instrumentação projetada com o objetivo principal de acompanhar o funcionamento de três turbinas hidrocínéticas, visando incorporar flexibilidade para diversas aplicações desse tipo de máquina.

A. Requisitos do Sistema

Os conversores hidrocínéticos instalados nos reservatórios a jusante de usinas hidrelétricas devem ser monitorados para

fornecer informações relacionadas ao seu desempenho de conversão e a integridade de seus sistemas mecânicos e elétricos (indicadores de manutenção e falha). As variáveis de monitoramento podem ser classificadas como:

- **Variáveis de recursos hidrocínéticos:** Dados associados à energia hidrocínética da entrada e às condições gerais no reservatório da usina. Algumas dessas variáveis podem ser compartilhadas com o sistema de monitoramento da unidade hidrelétrica;
- **Variáveis de desempenho:** Relativos a potência elétrica convertida (tensão, corrente elétrica e velocidade de rotação);
- **Variáveis de operação:** Relacionadas às condições das máquinas, níveis de temperatura (gerador e caixa de transmissão), vibração interna e sensor de presença de água.
- **Variáveis de acionamento:** Correspondente ao estado das bombas de resfriamento do gerador e as bombas de porão.

Na Tab. I e na Fig. 2 são apresentadas as principais variáveis do sistema HK-10. Com esse conjunto de variáveis, o funcionamento da turbina hidrocínética pode ser monitorado adequadamente em seu desempenho e as principais falhas podem ser identificadas. Uma faixa preliminar de medições de variáveis pode ser considerada. Todos esses parâmetros também podem ser complementados pelos dados operacionais da usina hidrelétrica (vazões, profundidade no reservatório de vazão, número de unidades de turbinas em operação etc.).

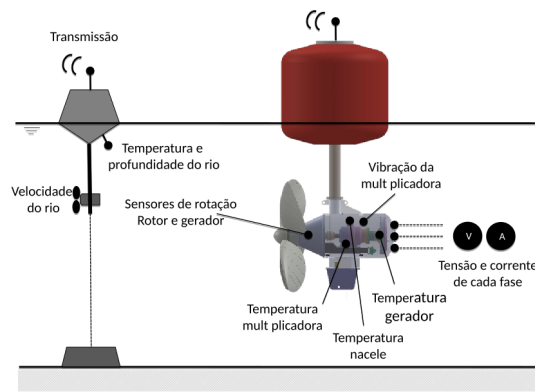


Fig. 2. Requisitos do sistema de uma turbina hidrocinética: variáveis de monitoração

Tab. I. Variáveis de monitoração e sensores recomendados

Variáveis de recursos hidrocinéticos		
Profundidade	Sonar ou sensor de pressão	0-20 m
Temperatura	Sensor de estado sólido impermeável	0-40°C
Velocidade do rio	Sensor de velocidade de hélice	0-4 m/s
Variáveis de desempenho		
Tensão	Circuito de divisão de tensão por fase	0-1000 V
Corrente	Sensor de efeito Hall por fase	0-20 A
Rotação	Sensor ótico do eixo do rotor	0-50 rpm
Variáveis de operação		
Temperatura	Nacelle, multiplicadora e gerador	0-90°C
Vibração	Acelerômetro de três eixos	0-1000 g
Presença de água	Sensor resistivo no porão da nacelle	on-off
Variáveis de acionamento		
Bombas	Relé mecânico	on-off

Tendo em conta as condições de operação do conversor hidrocinético flutuante, o sistema de monitoramento foi projetado para operar em condições de variações do nível do reservatório, ou até com a presença de ondas incidindo na plataforma flutuante. Desta forma, o sistema também deve transmitir os dados do local instalado para uma estação terrestre, a uma distância de aproximadamente 70 metros, o que pode ser feito pelo uso de um sistema sem fio (Wi-Fi, GSM ou satélite).

O sistema de proteção dos eletrônicos embarcados para monitoramento, bem como a fonte de alimentação local, também foram considerados como requisitos do projeto.

B. Instrumentação

O projeto de instrumentação foi desenvolvido para a monitoração conjunta de três unidades da turbina hidrocinética HK10. Além de considerar os requisitos citados na seção anterior, o sistema projetado visou como principais características a reconfigurabilidade, modularidade e o custo total. O diagrama apresentado na Fig. 3 representa todas as funções e sensores implementados para cada máquina.

Para o gerenciamento de toda informação advinda da instrumentação, o microcontrolador Arduino Mega 2560 foi empregado. Esta plataforma eletrônica de código aberto é baseada em um microcontrolador ATMEL ATmega2560 que

possui uma velocidade de 16 MHz, com 256 KB de memória flash, dos quais 8 KB é usado por um carregador de inicialização pré-programado, que também possui 8 KB de SRAM e 4 KB de EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*). Além disso, possui ainda 54 pinos de I/O digitais e 16 pinos de entrada analógicos, oferecendo suporte e matriz de outros recursos, tais como: I²C (Circuito Inter-Integrado), modulação por largura de pulso (PWM), interrupções externas, interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) e comunicação serial TTL (*transistor-transistor logic*). Cada turbina usa 5 portas analógicas e 8 portas digitais, somando até 16 portas analógicas e 38 digitais ao incluir as funções da plataforma. A corrente máxima suportada em cada um desses pinos é 20 mA ou 50 mA no pino de 3,3 V. Um conversor analógico/digital de 10 bits converte uma entrada em seus pinos analógicos de 0 a 5 V, possuindo assim uma resolução de 4,8 mV por passo. Desta forma, os recursos oferecidos por este microcontrolador permitem a flexibilidade da aplicação da plataforma de instrumentação de uma turbina hidrocinética.

Para transmissão sem fio de dados, o componente WiFi ESP8266-07 foi adicionado. Este componente é de baixo custo e oferece: SPI, I²C e comunicação serial TTL, um conversor analógico digital de 10 bits, uma antena de cerâmica e possui seu próprio microcontrolador com 80 MHz. A comunicação serial TTL foi usada para se comunicar com o componente WiFi com o microcontrolador principal (Arduino).

Para comandar o acionamento das bombas, de porão e refrigeração, o componente de atuação implementado foi um relé mecânico, JQX-3F, que possui uma bobina de ativação de 5 V, uma carga nominal de 10 A para 250 VCA/30 VCC e uma resistência de isolamento capaz de manipular tensões superiores a 1000 VCA/500 VCC.

Para armazenar todos os dados oriundos da operação, um slot para cartão SD padrão foi adicionado a plataforma de instrumentação. O cartão SD funciona em 3,3 V ou 5 V e usa o protocolo SPI para se comunicar com o microcontrolador principal. Além disso, um *real time clock* (RTC) foi incluído no módulo de monitoramento para armazenar a data e hora juntamente com os dados para o cartão SD. Este RTC se comunica com o microcontrolador principal usando o protocolo I²C.

O módulo de potência (coleta de dados relacionados a energia gerada) consiste em um transformador de corrente e um divisor de tensão. O transformador de corrente selecionado é um SCT-013-000. Este transformador consiste em uma bobina de 2000 espiras e foi escolhido por seu baixo preço e por permitir medidas de corrente alternada não invasivas de até 100 A. A conexão entre este sensor e o módulo de instrumentação exigiu um circuito de condicionamento do sinal exclusivo. Sabendo-se que medir correntes com o microcontrolador selecionado é impossível, definiu-se que a corrente deve de alguma forma ser transformada em uma tensão entre 0 a 5 V. A transformação pode ser alcançada com um resistor de carga, que precisa ser calculado para fornecer uma boa resolução. Devido às 2000 voltas de sua bobina, o transformador de corrente diminuirá a corrente medida 2000 vezes. E, de acordo com a especificações do gerador, a corrente

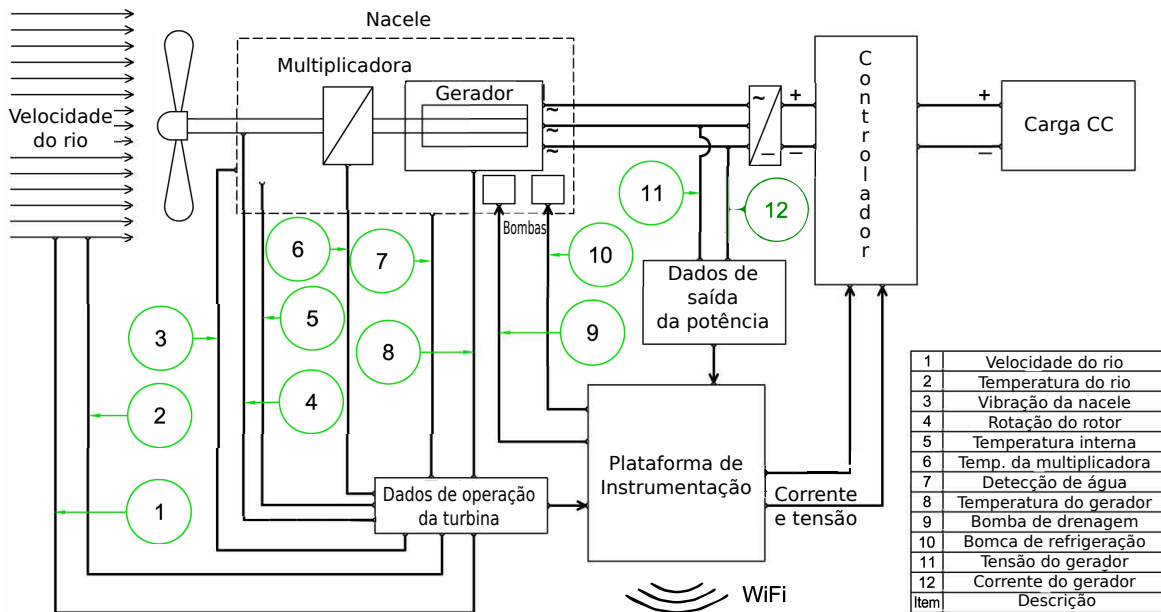


Fig. 3. Diagrama de instrumentação para todas as funções de cada turbina HK10.

máxima possível é de 35A RMS. Isso significa que a corrente de pico primária, I_{pc} , será:

$$I_{pc} = I_{RMS} \times \sqrt{2} = 35A \times \sqrt{2} = 49,50A. \quad (1)$$

Assim sendo, a corrente de pico secundária, I_{sp} , será:

$$I_{sp} = I_{pc}/n^{\circ} \text{ bobinas} = 49,50A/2000 = 24,75mA. \quad (2)$$

A conversão dessa corrente secundária em uma corrente contínua requer um retificador. Usando uma ponte de diodo simples, a onda CA é cortada ao meio e, assim, aumenta a resolução da medição. O resistor de carga ideal, R_{ci} , foi calculado da seguinte forma:

$$R_{ci} = AREF/I_{sp} = 5V/0,02475A \approx 200\Omega, \quad (3)$$

em que $AREF$ é a tensão de referência máxima do microcontrolador, que é de 5 V. Notando-se que resistores não são ideais, é recomendada a escolha de uma resistência maior do que a resistência ideal para evitar a ultrapassagem de 5 V. No entanto, neste caso, a ponte de diodos Schottky contribui com o aumento da resistência total do circuito, possibilitando assim escolher o próprio R_{ci} calculado, resultando em uma resistência total maior que 200Ω. Um capacitor de 10 μF também foi adicionado para suavizar a corrente retificada. A Fig. 4 apresenta o esquema do condicionamento de sinal do transformador.

A Fig. 5 mostra o esquema do divisor de tensão projetado. Observe que o divisor de tensão inclui um retificador de capacidade de 10 kW, um relé mecânico e um diodo zener. O retificador converte a tensão alternada em contínua e, posteriormente, a tensão é dividida em uma relação 1000 V a 5 V. Se a tensão for inferior a 500 V, o relé é ativado pelo microcontrolador, que então produz uma relação de 500 V a 5 V. Caso a tensão de 5 V seja superada, um diodo zener liga a tensão excedente a tensão de referência. O principal motivo para projetar um divisor de tensão personalizado foi a

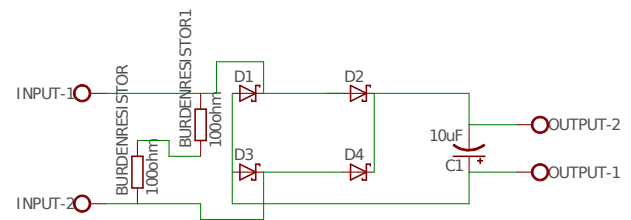


Fig. 4. Condicionamento de sinal para transformador de corrente

indisponibilidade comercial de um sensor de tensão de baixo custo capaz de medir tensões dentro da faixa desejada.

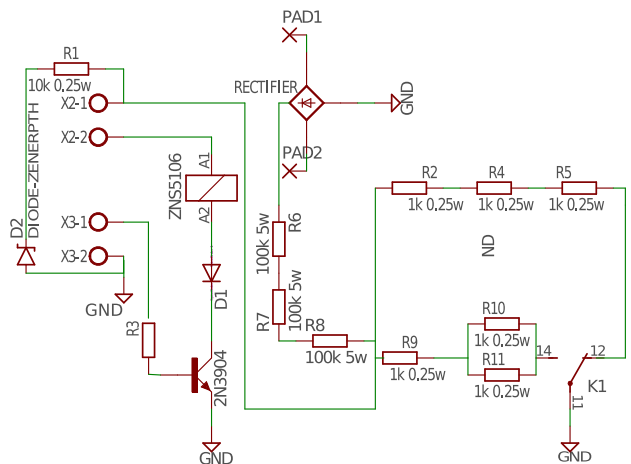


Fig. 5. Esquema do divisor de tensão projetado para medir tensão

Todas as medidas de temperatura, apresentadas na Fig. 3, foram executadas por intermédio do sensor digital DS18B20. Esses sensores são impermeáveis e possuem um conversor a/d

próprio configurável de 9 a 12 bits com uma faixa de -55 a 125 graus Celsius, uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}C$, sendo necessário o uso de apenas um pino do microcontrolador.

O sensor de proximidade LJ12A3 foi usado para medir a velocidade de rotação do rotor. O sensor requer uma fonte de energia de, pelo menos, 12 V, e a saída é binária (on = 12 V, off < 1,5 V). Um simples divisor de tensão de 2 resistores alterou a tensão de saída para um máximo de 5 V. O princípio de funcionamento deste sensor é que ele detecta engrenagens metálicas de uma engrenagem dentada concêntrica ao eixo do rotor. Conhecendo o número de dentes e o tempo decorrido entre duas engrenagens, pode-se calcular a velocidade de rotação.

Para detecção de água, foram utilizados sensores de nível flutuante, que nada mais é que um interruptor ligado a uma boia que é acionada em determinado nível de água.

O acelerômetro analógico ADXL335 também foi utilizado. Este componente mede as vibrações em 3 eixos.

Para medir a velocidade do rio uma pequena hélice com um ímã e uma bobina foi empregada. O ímã gira, juntamente com o hélice, induzindo uma pequena corrente CA em sua bobina impermeável. A Fig. 6 mostra o esquema do amplificador projetado. O sinal do impulsor foi primeiro filtrado com um filtro RC, depois o sinal foi amplificado com um amplificador instrumental, que foi feito usando três dos quatro amplificadores operacionais de um LM324. O quarto amp-op foi usado como um comparador, que muda para 5V se uma certa tensão de entrada é ultrapassada e volta para 0V se a entrada está abaixo do limite de tensão. A partir deste condicionamento de sinal e de uma calibração prévia, foi possível correlacionar a velocidade do rio e o tempo decorrido entre os picos de tensão.

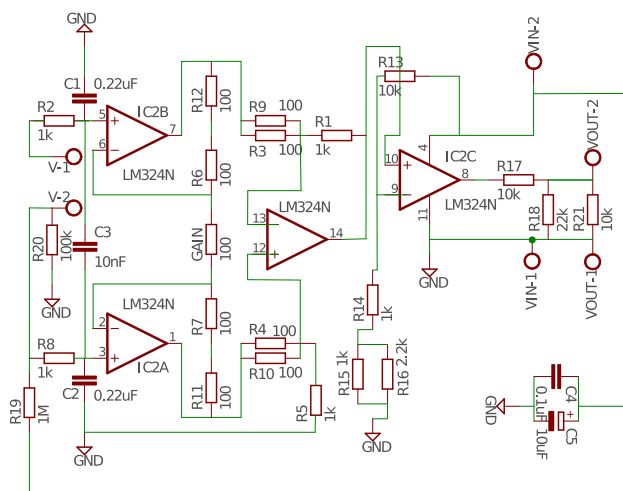
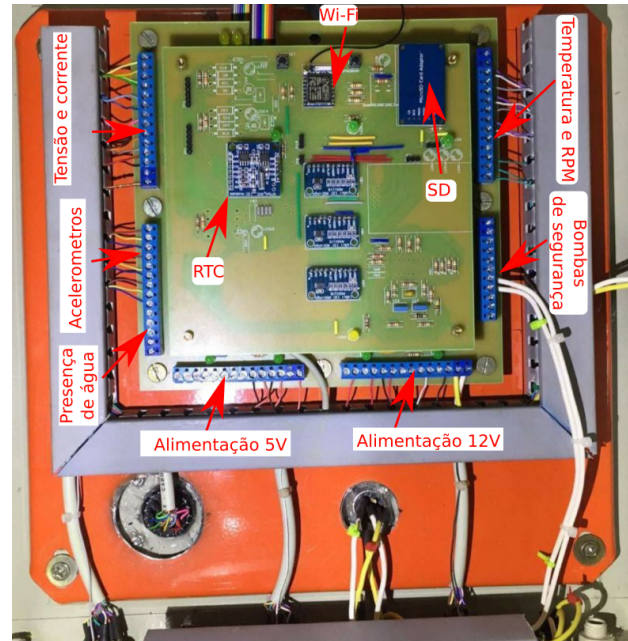


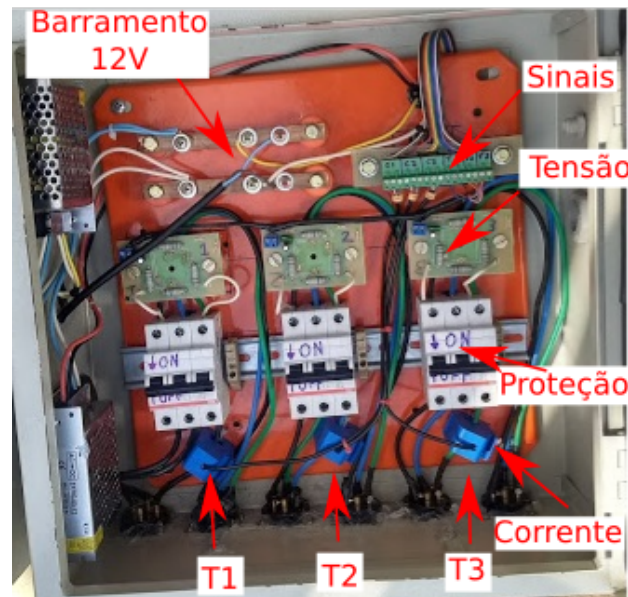
Fig. 6. Esquemático para sensor de fluxo de água projetado

Todos os sensores mencionados foram ligados nos dois quadros elétricos apresentados na Fig. 7. O primeiro quadro, Fig. 7 (a), apresenta de fato o quadro de instrumentação, sendo possível ver a placa de circuito impresso desenvolvida para alojar o microcontrolador e todos os circuitos condicionadores de sinal. Já a Fig. 7 (b) apresenta o quadro de potência da plataforma de três turbinas HK10. Neste quadro, é possível

observar a saída elétrica, de cada máquina, pelo disjuntor, juntamente com os sensores de corrente e tensão. Também no quadro de potência é possível ver, em sua lateral direita, as fontes de tensão utilizadas para fornecimento de energia para todo conjunto de instrumentação.



(a)



(b)

Fig. 7. Quadros de elétricos. (a) Quadro de instrumentação. (b) Quadro de potência.

C. Interface Gráfica do Utilizador (GUI)

A instrumentação da turbina HK10 é monitorada pelo sistema supervisor ScadaBR, software advindo do ambiente de desenvolvimento SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Sua funcionalidade permite uma gama de operações



Fig. 8. Interface gráfica projetada para monitoramento da turbina HK-10, desenvolvida no software ScadaBR. (a) Representação inicial do sistema geral para o ensaio realizado na hidrelétrica UHE Bariri (b) Aba individual da turbina 3.

como monitoramento, armazenamento, processamento de dados e controle do sistema. As interfaces gráficas oferecidas por esse supervisor permitem a avaliação do funcionamento do sistema, trazendo confiabilidade à leitura de dados por meio da identificação de possíveis falhas.

O ScadaBR é um sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) baseado em Tomcat que, como padrão, oferece um banco de dados derby, mas pode ser configurado para suportar o banco de dados MySQL criado, assim como foi feito nesta aplicação.

Por meio do protocolo de comunicação Modbus TCP/IP, o sistema supervisor ScadaBR recebe os dados emitidos e permite a interpretação dos mesmos. Ou seja, os dados encapsulados no protocolo Modbus, os quais são enviados pela plataforma de instrumentação via WiFi, são recebidos pelo ScadaBR, armazenados no banco de dados MySQL e apresentados a um observador por meio do servidor Web Tomcat.

No sistema HK10, os principais fatores que se deseja analisar como forma de se mensurar o desempenho das turbinas hidrocínéticas, em termos de geração de energia, são: rotação das turbinas [*RPM*], tensão [*V*], corrente [*A*] e velocidade do rio [*m/s*]. São aferidas também as temperaturas [*°C*] do rio, da Nacele, do gerador e da caixa de transmissão. Assim, todos esses dados, uma vez encapsulados no protocolo Modbus e enviados pela plataforma de instrumentação via Wi-Fi, serão então recebidos pelo ScadaBR, salvos no banco de dados MySQL e apresentados a um observador no servidor web Tomcat. As representações gráficas criadas para o Hydro-K estão demonstradas na Fig. 8.

IV. RESULTADOS

No sentido de averiguar o correto funcionamento da turbina hidrocínética, juntamente com sua plataforma de monitoramento, uma bateria de testes com somente uma unidade da turbina HK10 foi realizada. O ensaio contou com a estrutura de suporte para as três máquinas, porém com uma única máquina operando na posição traseira. Para simular as outras duas turbinas, dois contrapesos foram instalados nas posições dianteiras. Como este foi o primeiro teste real do conjunto,

escolheu-se não realizar dentro da usina hidrelétrica. Para simular as condições de operação da turbina, optou-se por realizar um ensaio por rebocamento do conjunto, de tal forma que a turbina foi tracionada por um barco dentro da baía de Guanabara, RJ, Brasil, como mostrado na Fig. 9. Os dados do teste foram coletados em duas corridas de teste com um período de tempo total de aproximadamente 40 minutos e são mostradas nas figuras subsequentes. Durante os testes, a única forma de carga conectada a turbina foi um banco de resistências que permitiu que a resistência elétrica fosse alterada manualmente.



Fig. 9. Ensaio em reboque da plataforma de turbinas hidrocínética.

Os gráfico da Fig. 10 apresenta a potência elétrica medida pelo sistema de monitoramento da turbina. O desempenho da máquina atingiu um pico de potência nominal (10 *kW*) para a rotação de 45 *RPM*, o que indica um regime de funcionamento sob condições acima da prevista (previa-se uma rotação nominal de 35 *RPM*). Isto coloca naturalmente

um problema de confiabilidade neste nível de operação da máquina devido à rotação muito alta. Tanto o gerador quanto todos os componentes do trem de potência foram dimensionados para rotações e torques nominais mais baixos. Se observarmos os resultados obtidos, na rotação de 35 *RPM* (que garante integridade do sistema eletromecânico da máquina) tem-se um nível de geração nominal da ordem de 8 – 9 *kW*.

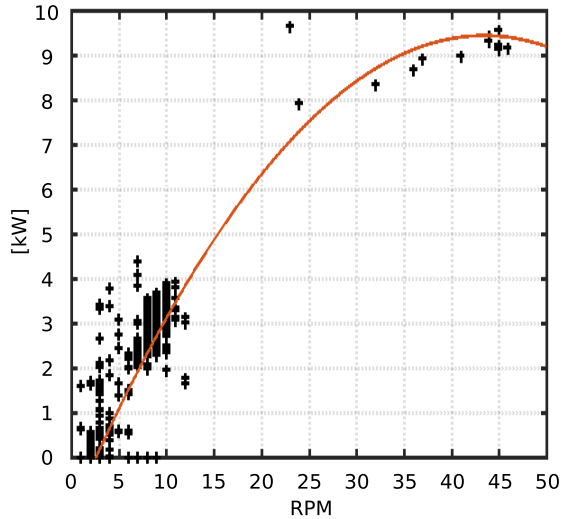


Fig. 10. Potência em função da rotação medidas no ensaio em reboque.

A Fig. 11 exibe as temperaturas da nacele, caixa multiplicadora, gerador e a da água aferidas durante o ensaio. Nota-se o perfeito funcionamento de todos os sensores temperaturas. É importante frisar que a turbina não ficou operacional durante todo o ensaio de reboque, devido a dificuldade de manter a direção do fluxo de água incidente no rotor. Sendo assim o tempo do teste não foi o suficiente para atingir o comportamento permanente da máquina, de forma que não foi possível observar nenhum valor de temperaturas críticas ($T > 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) em quaisquer dos lugares aferidos. Desta forma, o sistema de bombas de resfriamento permaneceu desligado durante todo o ensaio. Nota-se que o maior incremento de temperatura ($\approx 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) ocorreu para a região do gerador, que chegou a registrar picos de geração de 3 *kW*, mas ficando muito distante de sua região de operação nominal, em consequências das condições do ensaio. Em relação as outras temperaturas da turbina, na nacele e na caixa multiplicadora, percebe-se um leve aumento ($< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), corroborando com a percepção que o tempo de ensaio não foi o suficiente para testar a operação nominal da turbina.

O segundo ensaio de campo do sistema com a plataforma completa com três unidades de turbinas hidrocínéticas montadas, foi realizado na Usina Hidroelétrica de Bairiri, SP, Brasil (ver Fig. 1c). Em contraste com o ensaio anterior, o teste da usina teve como principal objetivo averiguar a integridade do sistema para períodos maiores, sendo que neste caso a turbina ficou instalada durante 5 dias. Neste ensaio, o circuito de cada turbina permaneceu isolado, de forma que cada gerador foi conectado a um banco de resistência que permitia a comutação da carga manualmente. Desta forma,

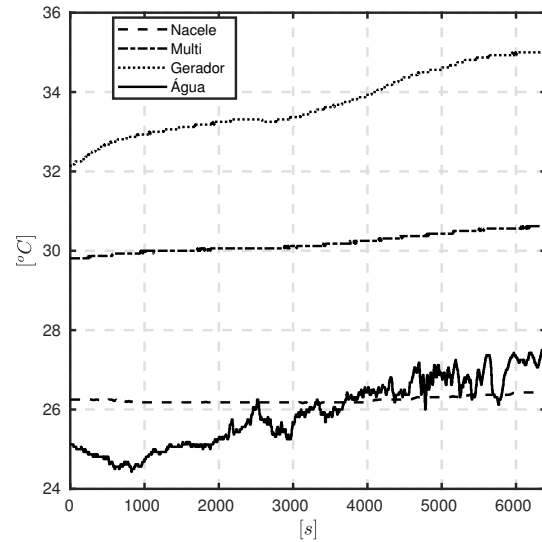


Fig. 11. Temperaturas da nacele, caixa multiplicadora, gerador e da água medidas no ensaio de reboque.

o despacho não possuiu nenhum tipo sistema de controle, levando a falta de sincronismo entre os geradores e ficando como uma pendência para futuras etapas do projeto. O registro dos dados obtidos para a máquina 3 é apresentado na Fig. 12. Por efeito da demanda normal da usina hidrelétrica, observa-se que o sistema operou durante os testes sob basicamente dois regimes distintos para a vazão do rio. O primeiro é relativo ao período de baixa carga imposta às turbinas principais da hidrelétrica, resultando em uma baixa vazão no reservatório jusante, sendo equivalente à velocidades de corrente da ordem de 1 *m/s*. Já o segundo regime é o oposto, posicionando a operação da máquina hidrocínética em condições de grandes velocidades do rio, próximas à 1,8 *m/s* e com um alto nível de turbulência.

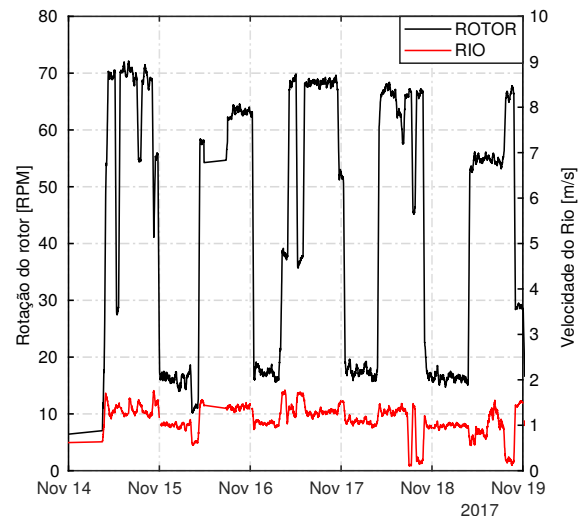


Fig. 12. Dados de rotação da máquina 3 e velocidade do rio.

Durante todo o período do ensaio, percebeu-se que o regime de rotação das máquinas permaneceu estável, sendo também

possível verificar uma correlação direta entre a rotação e a mudança do regime de velocidade do rio. Tal relação, dificultando o melhor aproveitamento de conversão da turbina, afastando a mesma de sua eficiência máxima. Além disso, esta correlação direta leva a períodos transitórios quase instantâneos, como visto nas transições da Fig. 12, em que há grandes variações de rotação ($\approx 50 \text{ RPM}$) em segundos, sem nenhum tipo de amortecimento, podendo ser perigoso para integridade do sistema. Desta forma, novamente, constata-se a necessidade de um sistema de controle adequado para regulação da velocidade do rotor de cada máquina.

Também durante o ensaio na hidrelétrica, verificou-se que sob condições de circuito elétrico aberto, o sistema se equilibrou com rotações nominais entre 20 e 60 RPM , identificando também alguns picos de aproximadamente 70 RPM . Isso só ocorre em condições de carga resistiva nula. Em outras condições, a máquina é naturalmente freada para condições próximas às nominais. O modelo matemático do sistema eletromecânico prevê os mesmos níveis de rotação para as condições registradas nos testes. Logo, o mesmo modelo pode ser utilizado para extrapolar valores para a operação da máquina em condições normais de carga.

Nesses testes, quando o ponto de operação transitava entre do sistema em vazio para a carga de 40 ohms, a velocidade de rotação do rotor caía cerca de 75%. Levando em conta esse valor e aplicando nos resultados dos testes na usina, pode-se considerar que no ponto de 70 RPM a turbina iria operar a 18 RPM , caso aplicássemos uma carga de 40 ohms. Por fim, baseado na curva do gerador, nota-se que com esses parâmetros a turbina geraria aproximadamente 6 kW .

Levando em conta uma velocidade de 2 m/s e 5 kW de potência elétrica nesta condição, a eficiência total dessa máquina ficaria 0,32. Em 2,5 m/s a máquina operaria em condições de carga controlada em torno de 7 – 9 kW .

Ainda baseando-se no ensaio realizado na hidrelétrica, a Fig. 13 apresenta os resultados obtidos para os níveis de vibração para as três coordenadas espaciais (X, Y, Z).

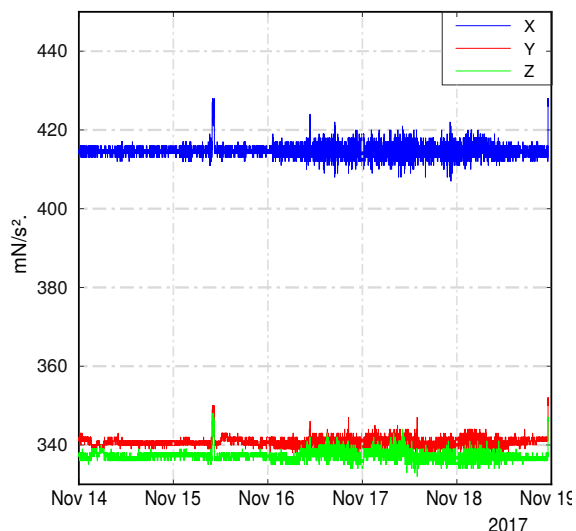


Fig. 13. Dados de vibração dos três eixos da máquina 3.

No decorrer de todo período da operação na hidrelétrica, os dados aferidos pelo acelerômetro foram quase constantes, sem quaisquer nível de vibração crítico, demonstrando que não houve nenhuma anormalidade mecânica do conjunto de potência da máquina. Dentre as três linhas no gráfico, a vibração no eixo X se destaca das demais, cerca de 20% maior, devido ao fato desta direção ser paralela ao sentido do eixo do rotor, tornando a carga levemente maior. Em contrapartida, nota-se que o comportamento ao longo de todo ensaio é o mesmo para as três direções, percebendo-se características similares perante as curvas apresentadas na Fig. 13, de tal forma que os picos ocorrem exatamente no mesmos instantes.

V. CONCLUSÃO

A plataforma de instrumentação projetada e desenvolvida é baseada em um design com o microcontrolador Arduino. A telemetria Wi-Fi integrada em um ambiente Scada-BR permitiu o monitoramento da operação de conversores hidrocinéticos por meio do acesso ao banco de dados online. O conceito empregado apresenta uma abordagem única para esse tipo de aplicação, dadas as condições específicas para sua integração em um sistema hidrelétrico, sendo os critérios de segurança bastante restritos e o acesso a redes telefônicas ou Wi-Fi é precário. Foi possível notar a perfeita operação da plataforma de instrumentação, de maneira que os sensores de temperatura, vibração e velocidade de rotação funcionaram sem falhas ou interferências de quaisquer ruído. Observou-se também que os níveis de temperatura e vibração se mantiveram dentro da faixa de segurança durante todos os testes, não sendo necessário o acionamento das bombas de refrigeração. Além disso, a transferência de dados Modbus TCP funcionou normalmente, os dados coletados foram salvos com sucesso no cartão SD e transmitidos sem falhas pela telemetria Wi-Fi, superando a distância de cerca de 70 metros entre a plataforma e um roteador na margem. De forma geral, o conjunto demonstrou um bom potencial e maturidade de desenvolvimento, necessitando aperfeiçoamentos para aumentar a robustez do conjunto, como a implementação de novos mecanismos de proteção e compatibilidade eletromagnética entre os quadros de potência e o de instrumentação. Também foi evidenciado a necessidade do aperfeiçoamento do controle do despacho e sincronismo da energia gerada por cada uma das turbinas. Cabe ressaltar a flexibilidade que conjunto de monitoração ainda tem para adicionar novas funções sem mudanças radicais em seu projeto original, devido a sua modularidade e ao baixo custo das peças selecionadas. No final, o protótipo integrado ao sistema demonstrou forte capacidade operacional, porém ainda há necessidade de progressos futuros para o desenvolvimento tecnológico para transformar a turbina HK10 em um produto comercial.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a empresa AES Tietê pelo financiamento desta pesquisa via projeto HYDROK.

REFERÊNCIAS

- [1] N. D. Laws and B. P. Epps, "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1245–1259, 2016.
- [2] M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 72–82, 2015.
- [3] A. K. Sleiti, "Tidal power technology review with potential applications in Gulf Stream," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 435–441, 2017.
- [4] M. Anyi and B. Kirke, "Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities," *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no. 2, pp. 110–116, 2010.
- [5] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.
- [6] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823–1835, 2009.
- [7] Y. Liu and D. J. Packey, "Combined-cycle hydropower systems - The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 228–231, 2014.
- [8] E. Lalander and M. Leijon, "In-stream energy converters in a river - Effects on upstream hydropower station," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 399–404, 2011.
- [9] P. d. S. Holanda, C. J. C. Blanco, A. L. A. Mesquita, A. C. P. Brasil Junior, N. M. de Figueiredo, E. N. Macêdo, and Y. Secretan, "Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants," *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1203–1214, 2017.
- [10] A. C. Brasil Junior, R. C. F. Mendes, T. F. Oliveira, T. Andriamparany, M. Kouidri, and A. L. Mesquita, "On the hydrodynamics of a row arrangement of hydrokinetic propeller turbines," *American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems*, vol. 3, pp. 19–24, 2016.
- [11] A. C. Brasil Junior, R. C. Mendes, T. Wrigg, R. Noguera, and T. F. Oliveira, "On the design of propeller hydrokinetic turbines: the effect of the number of blades," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 6, 2019.
- [12] I. Montero Dupont, R. I. Soares Pereira, S. C. Silveira Juca, and P. C. Marques de Carvalho, "Internet of Things Data Acquisition System Applied to Photovoltaic Water Pumping," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 10, pp. 2547–2560, 2019.
- [13] C. Albaladejo, P. Sánchez, A. Iborra, F. Soto, J. A. López, and R. Torres, "Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review," *Sensors*, vol. 10, no. 7, pp. 6948–6968, 2010.
- [14] G. Durante, W. Beccaro, and H. E. M. Peres, "IoT Protocols Comparison for Wireless Sensors Network Applied to Marine Environment Acoustic Monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, 2019.



Rafael C. F. Mendes Possui graduação em Engenharia de Energia pela Universidade de Brasília (2013), mestrado em Ciências Mecânicas pela Universidade de Brasília (2015) e está cursando doutorado com previsão de término em 2019. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecânica dos Fluidos, atuando principalmente nos seguintes temas: energias renováveis, aerodinâmica de turbinas de eixo horizontal e experimentos em túnel de vento.



Ramsay R. Mac Donald Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Anton de Kom Universiteit Van Suriname (2014), mestrado em Sistemas Mecatrônicos pela Universidade de Brasília (2018). Atualmente é professor pela Anton de Kom Universiteit Van Suriname. Tem experiência em engenharia mecânica, atuando nos seguintes tópicos: turbinas hidráulicas e programas de modelagem.



Ana Rafaela S. Miranda Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília (UnB), mestrada em Sistemas Mecatrônicos pela UnB e graduada em Engenharia de Energia pela UnB. Integra o grupo de pesquisadores do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Atualmente desenvolve pesquisas em remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos, com foco em emissões atmosféricas de metano.



Rudi H. van Els Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão (1990), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília na área de controle e computação (1994) e Doutorado pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (2008). Professor adjunto da Universidade de Brasília do curso de engenharia de energia no campus Gama e do Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos e Automação e energia renovável.



Maurício A. Nunes Engenheiro Mecânico pela Universidade Paulista, UNIP, (2016). Atualmente trabalha na área de engenharia da empresa AES Tietê. Tem experiência na área de Análise de Vibração, Mecânica, Mecatrônica e Automação.



Antonio C. P. Brasil Jr Antonio C. P. Brasil Junior é graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1982) com mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1985). Seu Doutorado na área de Thermique et Energetique; foi obtido na Ecole Centrale de Lyon - França em 1992. Atualmente é professor associado da Universidade de Brasília. As atividades acadêmicas do professor estão associadas ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da UnB. Na área de ciências mecânicas os principais temas de interesse são: termociências e energia renováveis.