

Sistema Microcontrolado para o Controle em Tempo Real do Ângulo de Ataque das Pás de Turbinas Eólicas

Victor Funabashi, Renato M. Monaro, Guacira C. de Oliveira e Silvio G. Di Santo

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

São Paulo, São Paulo, Brasil

Email: victor.funabashi,monaro,guacira,silviogiuseppe@usp.br

Abstract—A energia eólica é a forma de geração de eletricidade, alternativa a geração hidrelétrica, que mais cresce no mundo. Para manter esse crescimento, o entendimento do funcionamento, da operação e do controle dos aerogeradores é de fundamental importância para futuros projetos. Este estudo pretende ampliar a compreensão sobre os controles necessários aos geradores eólicos, especialmente o controle aerodinâmico de suas hélices. Como produto deste estudo, foi implementado o controle do ângulo de ataque das pás de um aerogerador, embarcado em um microcontrolador. Este controle foi testado e validado por meio de simulação em laço fechado e em tempo real com a finalidade de avaliar seu desempenho em um sistema eólico próximo ao real. Os testes apontam que o controle embarcado no microcontrolador é capaz de operar adequadamente para o controle de ataque das pás de um aerogerador.

I. INTRODUÇÃO

Na atualidade, avanços tecnológicos ocorrem nas diversas áreas da ciência e tecnologia. Esses estão ligados diretamente a geração de energia elétrica, que pode ser obtida através de recursos não-renováveis (carvão mineral, petróleo...) e renováveis (água, vento). Devido as constantes crises hídricas, tem-se ampliado a produção de energia renovável através da força do vento, denominado por eólica. Outro motivo de sua popularização é a baixa emissão de gases tóxicos, além da constante oferta [1] e [2]. Segundo [2], a energia eólica tem crescido 25% por década. Este crescimento tem refletido na evolução das tecnologias envolvidas na transformação de energia dos ventos em energia elétrica, o que atrai interesse na América do Norte, Europa, Austrália entre outras regiões do mundo [1]. No Brasil, há aproximadamente 2200 MW instalados e o uso efetivo de 760 MW [3].

Mediante o contexto descrito, este estudo considera relevante investigar o funcionamento de uma turbina eólica, afim de aprimorar sua operação e controle, de forma a implementar um controle em um microcontrolador que será capaz de operar em parques eólicos reais. Para isto, foram investigadas as condições ambientais e as respectivas respostas da turbina, que são ajustadas pelo controle para que não haja danos físicos aos equipamentos. Este controle foi embarcado em um microcontrolador e empregado, em laço fechado com o *Real-Time Digital Simulator* (RTDS), para exercer o controle

das pás de um gerador eólico. Este controle busca evitar uma operação em situações limites, as quais acarretam no desgaste do equipamento, e consequentemente falha na operação.

II. DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico modelado no RTDS está representado na figura 2. Este é constituído de uma torre com hélice de raio de 41 metros, a frequência do sistema elétrico conectado é de 60 Hz, a velocidade nominal do gerador elétrico é de 1200 rpm, a potência é de 1,8 MVA, nas condições de temperatura de 15°C, pressão de 1,015 mbar e umidade relativa do ar em 30% [4].

A máquina de indução com rotor gaiola de esquilo, cuja curva de saturação é linear, possui tensão nominal de 0,6 kV, potência nominal de 1,8 MVA, frequência de operação de 60 Hz e reatância não saturada de 3,454 p.u. O rotor tem resistência de 0,0062 p.u. e reatância de 0,0834 p.u. A constante inercial da máquina (H) é 4,75 MW/MVA e a fricção é de 0.001 p.u./p.u..

Foram usados dois transformadores (considerados ideais). O primeiro, com fechamento estrela-triângulo, é usado para cada gerador e eleva a tensão de 0,69 kV para 34,5 kV e potência nominal de 1,8 MVA. O segundo, com fechamento estrela-estrela, representa o transformador elevador do parque eólico e eleva de 34,5 kV para 138 kV e sua potência é de 115 MVA.

O circuito equivalente da rede foi simplificado a um equivalente de Thévenin, isto é, com um gerador de 138 kV (frequência de 60 Hz e fase de 0°) e uma impedância de 0,001 Ω.

A curva C_p descreve o rendimento da turbina do gerador. Na figura 1 é ilustrada a curva C_p para o modelo de turbina utilizado neste estudo. Nesta é possível observar que o rendimento da turbina é função de λ , que é a razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, e β , que é o ângulo de ataque das pás (*pitch angle*), ver equação 1. Esta curva mostra que o controle de β está diretamente ligado a potência extraída pelo gerador, sendo, este controle, um dos principais objetivos deste estudo.

$$C_p = 0,3803 (\lambda - 0,0604 \cdot \beta^2 - 4,5931) \cdot e^{-0,155 \cdot \lambda} \quad (1)$$

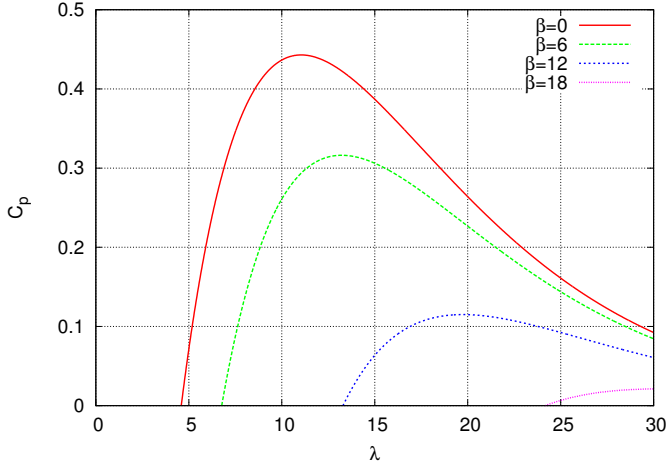


Fig. 1. Curva C_p do gerador

III. METODOLOGIA

A implementação do controle ocorreu em duas etapas, ambas em tempo real. A primeira foi uma simulação através do RTDS (controle e sistema elétrico implementados) e na segunda etapa o controle foi implementado no kit microcontrolador STM32F4-Discovery, enquanto que o sistema elétrico continuou no RTDS.

A. Controle implementado no RTDS

Primeiramente, o controle do ângulo de ataque foi desenvolvido no RTDS. A figura 3 mostra o diagrama de blocos do controle de potência simulado, onde a turbina, o gerador e a rede são partes do sistema elétrico (descrito na seção II).

O bloco de dados recebe os sinais das tensões e correntes das linhas, destes é determinada a potência ativa (potência medida) de acordo com a equação 2. O sinal de erro entre a potência medida e a potência desejada é enviada a um controle do tipo proporcional-integral, que age modificando a posição do ângulo de ataque das pás.

$$P(t) = \sum_i V_i(t) \times I_i(t), \quad i = a, b, c \quad (2)$$

Um esquema do controle de velocidade está ilustrado na figura 4. Neste, a velocidade da turbina é comparada com a velocidade desejada e o erro entre as duas é enviado a um controlador PI, que modifica o ângulo de ataque das pás. O controle gera um ângulo de saída, que limita a variação e o valor absoluto atribuído ao ângulo das pás.

A figura 5 mostra os dois controles implementados. A parte superior da figura é o controle de velocidade e a parte inferior, o controle de potência. Uma chave foi utilizada para comutar entre os dois modos de controle. Vê-se que os valores das constantes K_p e K_i usados foram 10 e 7,5 (1/T), respectivamente.

Na saída do controle, há dois limitadores, eles são postos para garantir às limitações físicas de operação da máquina, sendo o primeiro do valor do ângulo de saída, de 0 até 30 graus, e o segundo, da variação deste, de $\pm 10^\circ$ graus/segundo.

IV. SISTEMA MICROCONTROLADO E INTERFACE COM RTDS

A segunda etapa deste estudo consistiu em embarcar o controle no microcontrolador e interligar à turbina (modelada no RTDS), conforme a figura 6.

O bloco de “GTAO” é referente a uma placa, *Digital-to-Analog Converter* (DAC) que realiza a conversão dos sinais digitais (simulados) em sinais analógicos (reais). Este sinal é limitado de ± 10 V, contudo, como o sinal foi enviado direto ao sistema microcontrolado, sem uso de um circuito condicionador, o limite do sinal de saída se altera para 0 V a +3,3 V.

De forma dual, o bloco “GTAI” representa uma placa, *Analog-to-Digital Converter* (ADC), que recebe os sinais analógicos do meio externo e envia de forma digital ao ambiente de simulação no RTDS.

Para embarcar o controle, foi utilizado o kit microcontrolador STM32F4-Discovery apresentado na figura 7. Esta placa possui um processador Cortex-M4 de 32 bits *Advanced RISC Machine* (ARM), 1 MB de memória flash, 192 kB de memória RAM, entradas USB para realizar a comunicação com um computador, portas (forma de alimentar a placa) dos tipos *General Purpose Input Output* (GPIO), ADC e DAC, dentre outras.

Naturalmente, nos envios e recepções de sinais há a necessidade de ajuste, tanto na escala, quanto em *offsets* dos sinais, para que estejam nos limites especificados nos equipamentos. No caso de 0,0 V a +3,3 V (da placa, por ser menor que do RTDS). Estes foram feitos digitalmente, isto é, sem uso de um circuito condicionador.

V. OPERAÇÕES NO MICROCONTROLADOR

A figura 8 mostra um diagrama de blocos com algumas das operações que ocorrem no microcontrolador. O bloco ADC é aquele que receberá os sinais analógicos do meio e os discretizará. Estes são filtrados por um filtro *Finite Impulse Response* (FIR), que se trata de um filtro passa-baixa utilizado para redução dos ruídos contidos nos sinais obtidos. Os dois blocos seguintes são similares aos contidos no simulador e possuem a mesma função.

O bloco DAC, possui a função de, dado um conjunto de valores, enviar para fora da placa um sinal analógico, obtido a partir dos valores discretos nele armazenado, limitado de 0,0 V a +3,3 V.

Para este projeto, optou-se por programar o *software* em linguagem C, por necessitar de menor alocação de memória e instruções quando comparada à linguagem C++. Além do fato da maioria das bibliotecas para programação com processadores ARM estarem nessa linguagem.

O microcontrolador tem suas ações na ordem apresentada no diagrama da figura 9.

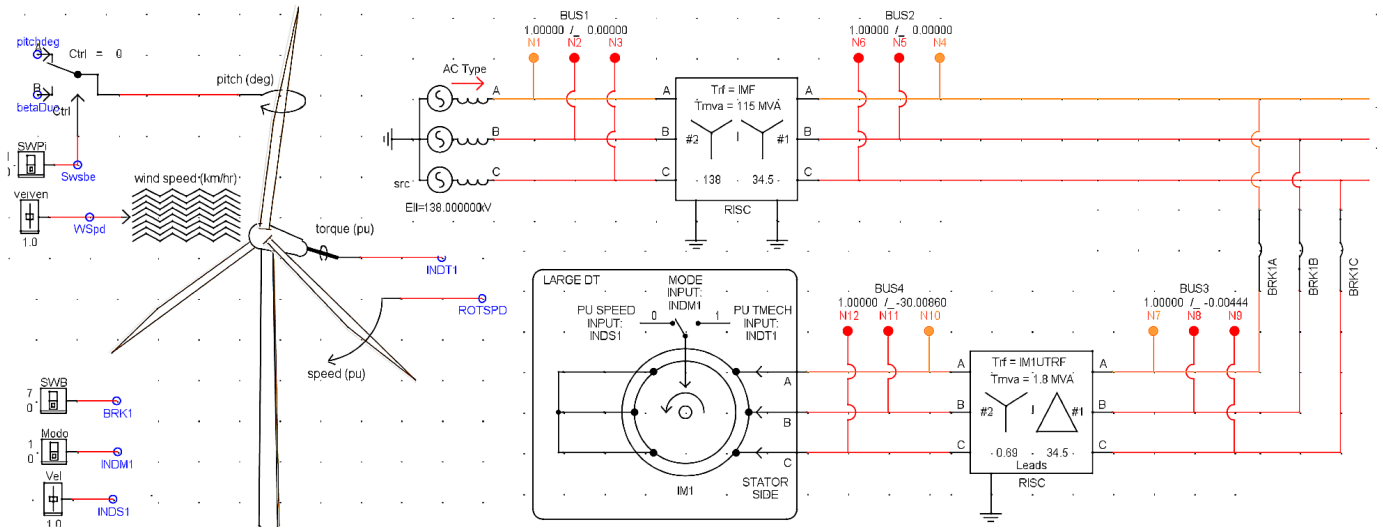


Fig. 2. Rede elétrica no RTDS.

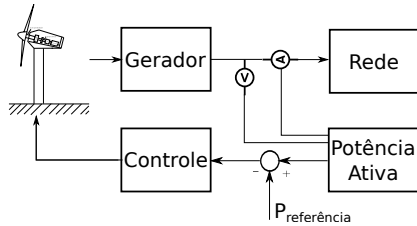


Fig. 3. Controle de potência implementado no RTDS.

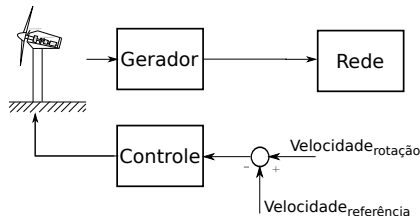


Fig. 4. Controle de velocidade implementado no RTDS.

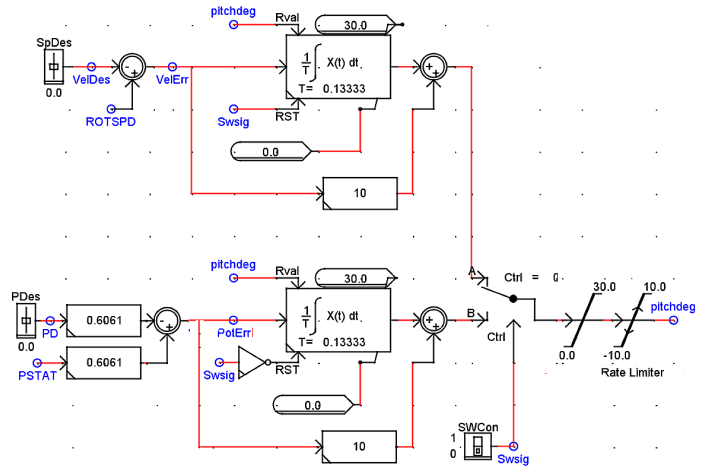


Fig. 5. Controle implementado no RTDS.

A. Aquisição

A aquisição dos dados ocorre a uma taxa de amostragem de 2 kHz , através do *Digital Memory Access* (DMA) gerando uma interrupção. Ao terminar a aquisição dos dados, uma variável de controle chamada de “NewData” receberá o valor 1, indicando que há novos dados e estes serão copiados para evitar problemas (mistura de dados por exemplo) e perda de dados antigos, caso as ações do software não finalizem antes da nova aquisição.

Cada um dos sinais adquiridos será uma variável armazenada em uma *struct* definida como *buffer* (vetor, *array* circular). Para estes foram definidas as funções “*buffer_init*”, “*buffer_read*” e “*buffer_write*” as quais inicializam, lêem uma determinada posição e armazenam um valor escolhido, respectivamente.

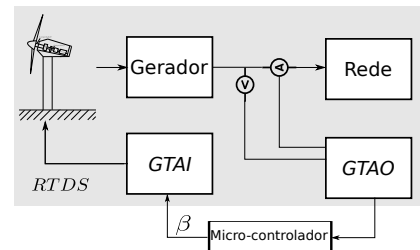


Fig. 6. Sistema microcontrolado e interface com RTDS.

B. Filtro Digital Passa-baixa

Os dados obtidos apresentam ruídos. Com o propósito de reduzi-los e consequentemente melhorar a ação do controle, foi usado um filtro digital passa-baixa do tipo FIR *lowpass filter*. Foi usado o método “*arm_fir_f32*” que recebe como parâmetros os dados listados abaixo:

- ponteiro para uma instância que representa a estrutura do

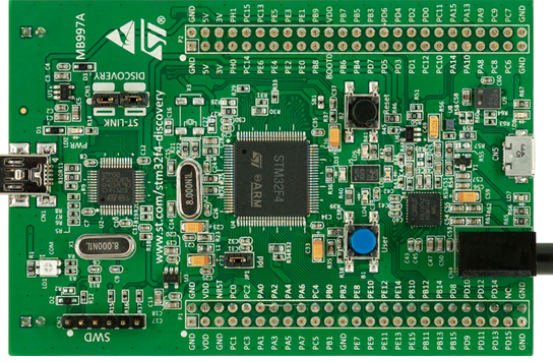


Fig. 7. Placa microcontroladora [5].

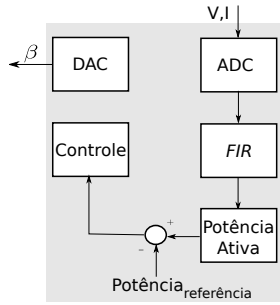


Fig. 8. Diagrama de blocos do sistema microcontrolado.

filtro;

- os coeficientes do filtro e sua ordem;
- um vetor de estado;
- o número de amostras processadas por chamada da função (1 amostra).

O projeto do filtro, ou seja a determinação dos coeficientes, foi feita no programa Octave [6]. O filtro projetado tem ordem 5 e frequência de corte de 500Hz. Para comparação optou-se por criar “buffers” auxiliares para armazenar os dados filtrados, assim não perdendo os originais e permitindo a comparação entre os sinais.

C. Controle da Potência Ativa e Reativa

Foram criados também outros dois *buffer*: os de potência ativa (P) e reativa (Q). Para tal, foi necessário calcular a respectiva potência através das equações 2 e 3. Onde $i = a, b, c$

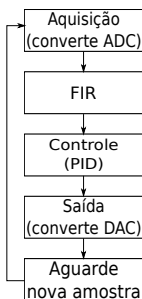


Fig. 9. Diagrama de blocos: etapas do software.

e $j \neq k \neq i$.

$$Q(t) = \frac{\sum_i V_i(t) \times (I_j(t) - I_k(t))}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

O controle foi feito com uso da função PID própria da ARM. Nesta a saída é um valor correspondente a uma ação. Este recebe os seguintes parâmetros:

- ponteiro para um elemento do tipo “arm_pid_instance_f32”;
- um valor de erro.

Ela segue a equação 4 feita no domínio da frequência, obtido através da transformada Z, em que “y” se refere à saída, “x” à entrada (erro), K_p à constante de proporcionalidade, K_i é a constante de integração e K_d é a constante de derivação.

$$y(n) = y(n-1) + A_0x(n) + A_1x(n-1) + A_2x(n-2) \quad (4)$$

$$A_0 = K_p + K_i + K_d \quad (5)$$

$$A_1 = (-K_p) - (2K_d) \quad (6)$$

$$A_2 = K_d \quad (7)$$

No caso, as constantes adotadas foram $K_p = 10$, $K_i = 7,5$, $K_d = 0$ (as mesmas do sistema simulado). A variável do tipo “arm_pid_instance_f32” armazena os valores das constantes, os dois últimos valores da entrada e o último da saída. Assim, foi possível gerar o valor de erro e então fazer uso da função, a qual devolverá o valor do ângulo desejado, que é a saída correspondente.

VI. RESULTADOS E ANÁLISES

Para averiguar a operação do controle simulado no RTDS, realizou-se mudanças nos valores desejados, para observar se a resposta acompanhava o valor de referência desejado.

A. Controle de Potência

Para o controle de potência, foi aplicado um degrau na potência desejada de 0 MW para 1 MW.

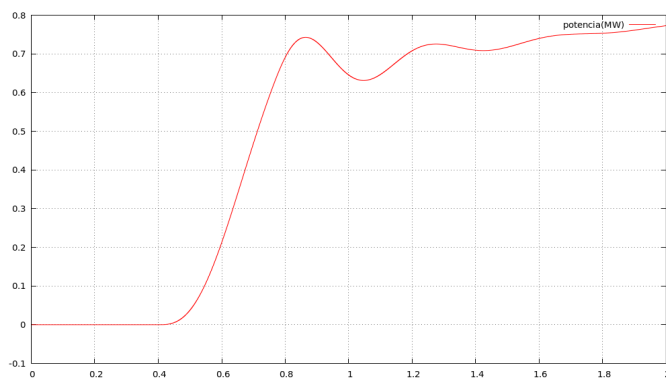
A figura 10(a) mostra o ajuste da potência, partindo de 0 MW e em 2 s chega em 0,8 MW, ou seja, está se aproximando do valor desejado. Logo, o controle age de forma a reduzir o erro.

Já a figura 10(b) mostra a mudança do ângulo para corresponder a este degrau. Nota-se que este reduz, de aproximadamente $14,1^\circ$ para $9,8^\circ$ nos primeiros dois segundos. Esta alteração era esperada, pois ao reduzir o ângulo de ataque, aumenta-se a potência gerada.

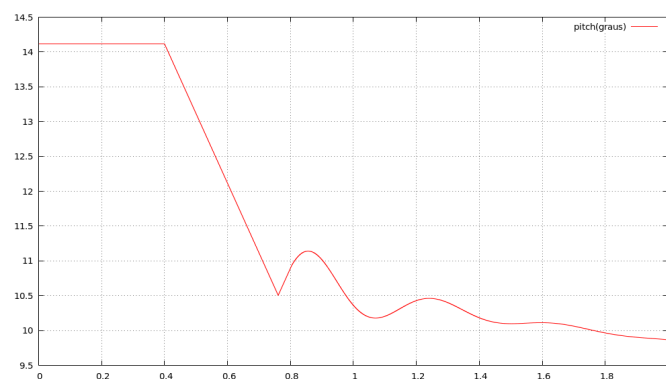
A figura 10 mostra que para o controle de potência, o sistema simulado no RTDS é bastante satisfatório.

B. Controle de Velocidade

Analogamente ao teste de potência, foi gerado um degrau de referência para a velocidade desejada (de 0,38 p.u. para 1 p.u.) visando avaliar o funcionamento do controle para este caso.

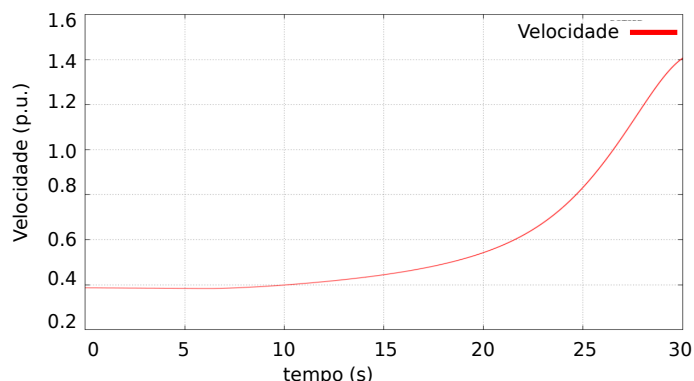


(a) Potência.

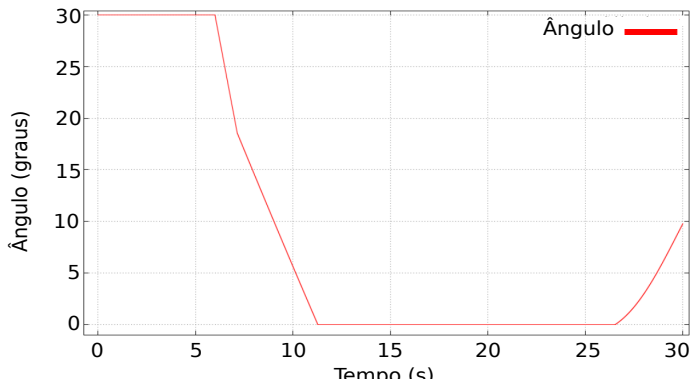


(b) Ângulo.

Fig. 10. Respostas a um degrau na potência desejada.



(a) Velocidade.



(b) Ângulo.

Fig. 11. Respostas a um degrau na velocidade desejada.

A figura 11(a) mostra o ajuste da velocidade conforme a referência fornecida. Já a figura 11(b) mostra a mudança do ângulo para corresponder a este degrau. Nota-se que, inicialmente, este é reduzido, de 30° para 0° para aumentar a velocidade de rotação. Após um período, volta a aumentá-lo, pois ocorre a passagem pelo valor de referência, logo, é necessário diminuir a velocidade e portanto, aumentar o ângulo.

A figura 11 mostra que também para o controle de velocidade o controle é eficiente, embora mais lento do que no caso de potência.

VII. CONTROLES SIMULADOS NO MICROCONTROLADOR

Feitas as análises no simulador, conferiu-se a atuação do software implementado no kit. Para tal, foi aplicado um degrau de potência de 0 MW para 1 MW, pois assim há um valor para comparação e possibilidade de conferir o quão próximo do desejado o controle está.

A. FIR

Foi desenvolvida uma avaliação da atuação do filtro, para modelá-lo de forma a aproxima-se do filtro real. Isto busca a otimização do controle.

A figura 12(a) mostra os valores das tensões obtidas no microcontrolador antes e após o filtro. Observa-se que o filtro melhora o sinal, removendo formas indesejadas, e aproximando o sinal a uma senoide. Percebe-se também a existência

de um atraso, contudo este não é um problema, pois como há filtros em todos os sinais obtidos, todos tem o mesmo atraso, de forma que a resposta do controle não foi afetada de forma significativa. Já a figura 12(b) mostra o mesmo sinal, mas dentro do simulador. Comparando ambos, o que se vê é que o sinal obtido após o filtro, está próximo do obtido no simulador, de forma que é um sinal aceitável para uso.

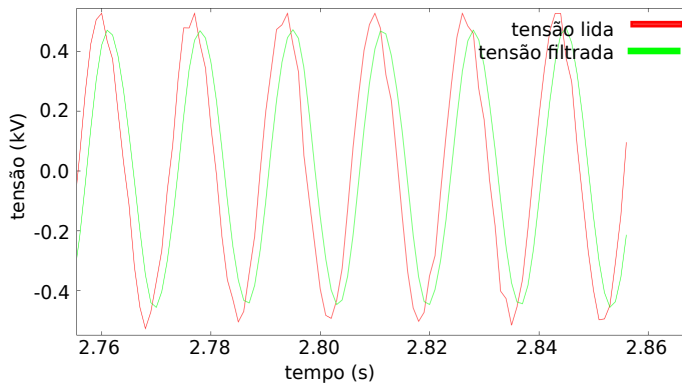
B. Controle de Potência

Como dito anteriormente, foi aplicado um degrau de subida na potência de referência, visando conferir a resposta do controle implementado no microcontrolador.

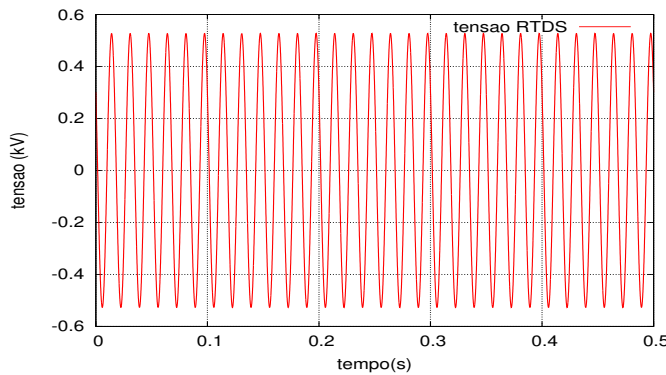
A figura 13(a) mostra a variação da potência calculada e da desejada, esta antes e depois do filtro. Nota-se que a potência de referência possui ruído elevado, contudo, após o filtro, este se reduz a uma grandeza aceitável para uso. Além disso, percebe-se que a potência calculada varia de forma a corrigir o erro, isto é, acompanha a variação da potência de referência.

A figura 13(b) apresenta o ângulo de ataque da pá para este degrau conforme calculado pelo microcontrolador. O que se vê é uma queda neste de 14° para 6° , aproximadamente. Isto é, assim como no simulador, o ângulo foi reduzido para se aumentar a potência obtida, situação esta conforme o desejado.

Este experimento comprova a eficiência e atuação do controle para correção da potência desejada.



(a) Tensão no microcontrolador.



(b) Tensão no simulador.

Fig. 12. Medidas de tensão no microcontrolador e no simulador.

VIII. CONCLUSÕES

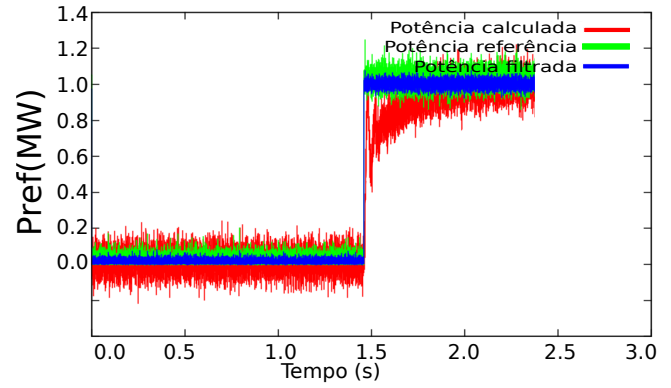
Foram estudadas as características de um gerador eólico e também entendidos os controles utilizados nestes, com enfoque no controle de ângulo de ataque das pás. Com base nos conhecimentos adquiridos, foi montado um controle deste tipo e testado, conforme anteriormente apresentado.

Como resultado deste estudo, foi possível realizar a simulação elétrica de uma turbina ligada à rede, de forma a avaliar os controles feitos. Havendo como referência os dados obtidos da simulação completa no RTDS, para o controle implementado no micro-controlador.

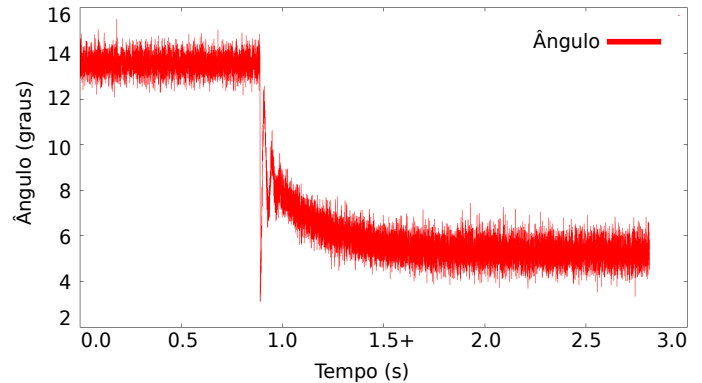
Também, implementou-se o controle em um kit microcontrolador tanto para o caso de análise de potência quanto de velocidade e, usando o sistema elétrico simulado e a interface com o RTDS, o controle foi testado, para conferir se sua atuação era condizente com o desejado.

A simulação em laço fechado, entre o microcontrolador e o RTDS, é pertinente pois mostra a performance do controle implementado no microcontrolador em um cenário muito próximo a operação real. Dessa forma a viabilidade técnica operacional é medida e os resultados aqui apresentados mostram que é oportuno embarcar o controle em hardwares dedicados, como exemplo em FPGA.

Por fim, é importante resaltar que a presença do ruído não alterou a qualidade da resposta. O que se observou com os testes foi correspondência, pois a ação permitiu que o sistema



(a) Potência.



(b) Ângulo.

Fig. 13. Respostas a um degrau na potência desejada.

acompanhasse a mudança do valor de referência.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de São Paulo em especial ao Laboratório de Pesquisa em Automação e Proteção de Sistemas Elétricos locado no Departamento de Engenharia de Elétrica e Automação Elétricas pela infraestrutura fornecida. E também à Associação dos Engenheiros Politécnicos-AEP pelo fomento de bolsa de estudo.

REFERENCES

- [1] MODELING AND DYNAMIC BEHAVIOR OF WIND GENERATION AS IT RELATES TO POWER SYSTEM CONTROL AND DYNAMIC PERFORMANCE, Working Group C4.601 Std.
- [2] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems. Wiley, 2012.
- [3] CCEE, "Boletim das usinas eólicas," Mar. 2014. [Online]. Available: <http://www.ccee.org.br/>
- [4] R. Kuffel, J. Giesbrecht, T. Maguire, R. Wierckx, and P. McLaren, "Rtds-a fully digital power system simulator operating in real time," in WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings., IEEE, vol. 2, May 1995, pp. 300–305 vol.2.
- [5] ST Microelectronics, "http://st.com." [Online]. Available: <http://st.com>
- [6] J. W. Eaton et al., Octave. John W. Eaton., 1999.