

## Proposta de Controle de *Yaw* em Aerogeradores Baseado em Dados de Campo

Clarissa O. Eccard Dias\*, Luiz A. M. Lima\*\*,  
Edson H. Watanabe\*, Robson F. S. Dias\*

\*Programa de Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Ilha do Fundão, CEP: 21945-970 Rio de Janeiro – RJ  
E-mails: clarissa\_eccard@poli.ufrj.br, watanabe@coe.ufrj.br,  
dias@dee.ufrj.br

\*\* Voltalia, 84 Bd. de Sébastopol, 75003 Paris, France  
E-mail: l.lima@voltalia.com

---

**Abstract:** The present work proposes three variations of yaw control systems and makes a comparative analysis of net generated energy gain and actuation number. The three yaw control system proposals are compared with two ideal controls. One in which the actuator is assumed to operate following the wind direction instantaneously without any limitation and the other with speed limitation. Controls were modeled and compared using one second field measurement data. The results indicate that, among the proposed variations, the one that presented the highest net energy gain is also the one with the highest number of actuations, concluding that there is a relationship between energy gain and number of actuations.

---

**Resumo:** O presente trabalho propõe três variações de sistemas de controle de *yaw* e faz uma análise comparativa de ganho de energia líquida gerada e número de atuação. As três propostas de sistema de controle de *yaw* são comparadas com dois controles ideais. Um em que se assume que o atuador opera seguindo a direção do vento instantaneamente sem nenhuma limitação e o outro com limitação de velocidade. Os controles foram modelados e comparados utilizando dados de medição de campo de 1s. Os resultados indicam que, dentre as variações propostas, a que apresentou o maior ganho de energia líquida é também a com maior número de atuação, concluindo-se é possível aumentar o ganho de energia em detrimento do aumento de número de atuações.

---

**Keywords:** yaw control, field measurement data, wind turbine, yaw

**Palavras-chaves:** controle de yaw, dados de medição de campo, turbina eólica, yaw

---

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema de controle de *yaw* (SCY) é responsável pelo alinhamento das turbinas eólicas à direção do vento e de extrema importância para o desempenho da conversão de energia eólica em elétrica. O desalinhamento de aerogeradores em relação à direção do vento impacta diretamente na captura de energia eólica. A literatura sobre o controle do ângulo de *yaw* é ainda escassa, e poucas informações e dados são encontrados. Contudo, dois modelos que representam esse controle se destacam. O modelo de controle de *yaw* da turbina NREL CART 3 – *Controls Advanced Research Turbine 3-Bladed* (Scholbrock et al. 2014) – e o modelo de controle de *yaw* Ming Yang (MY) utilizado por um fabricante (Song et al. 2018).

O objetivo do sistema de controle de *yaw* é minimizar o erro entre o ângulo de *yaw* e a direção do vento. Porém, a minimização do erro de *yaw* pode também induzir o uso excessivo do seu sistema de controle, com desgaste excessivo do atuador. Assim, deve haver um balanço entre o ganho de geração de energia e o ciclo de trabalho do atuador de *yaw* (Dai et al. 2021). Em Pérez et al. (2013) é realizada uma análise para identificar quais componentes da turbina eólica falham

com maior frequência e o sistema de controle de *yaw* é responsável por, aproximadamente, 12,5% dessas falhas.

Os parâmetros do SCY das turbinas, normalmente, são ajustados para uma condição de referência de “pior caso”, essa condição é geralmente diferente das condições reais do local de operação. Assim, é importante otimizar o SCY para a condição local de operação (Pinto, B. 2021).

O presente trabalho propõe três variações desses sistemas de controle de *yaw* e faz uma análise comparativa de ganho de energia e número de atuação por um período baseado em dados de medição real de direção do vento a cada 1s da empresa Voltalia. Essa medição foi feita com amostragem a cada segundo e em um período de 24h. Assim, foi utilizado como ponto de partida do controle de *yaw* em uma turbina, o SCY proposto em (Song et al. 2018), em que utiliza três controles de bandas mortas de posição (erro de ângulo de *yaw*) e de tempo (duração do erro acima de determinado valor). Estes controles são acionados em ciclos com apenas uma atuando por vez. As três variações deste sistema propostas neste trabalho são as seguintes:

- CYPT1 – Controle de *Yaw* com três bandas mortas de Posição e Tempo com atuação sobrepostas e parâmetros da literatura.

- CYPT2 - Controle de *Yaw* com variação das três bandas mortas de Posição e Tempo.
- CYP - Controle de *Yaw* com apenas três bandas mortas de Posição.

O objetivo do trabalho é comparar os controles acima com dois casos ideais, em que se assume que o atuador opera seguindo a direção do vento instantaneamente, o primeiro sem nenhuma limitação e o segundo com limitação de velocidade.

Os controles foram comparados em termos de geração líquida de energia e número de atuação considerando os dados de medição. Os resultados indicam que o controle CYPT1 apresentou o maior ganho de energia líquida, mas com um número de atuação superior aos outros controles.

O restante do trabalho é organizado da seguinte forma. Na seção 2, são apresentados o detalhamento do sistema de controle de *yaw* e dos dados de medição, bem como, os controles propostos. Na seção 3, os controles são detalhados com a indicação de diagrama de blocos de como foram implementados. A análise comparativa entre os controles é feita na seção 4 e a conclusões são apresentadas na seção 5.

## 2. SISTEMA DE YAW DE AEROGERADORES

### 2.1 Impacto do ângulo de yaw na geração de energia

O ângulo de *Yaw* corresponde ao ângulo de rotação da nacela sobre o eixo vertical da torre. O SCY tem a função de manter o eixo horizontal do rotor da turbina alinhado com a direção do vento com o intuito de obter a máxima extração de energia do vento.

A potência extraída do vento, é expressa por:

$$P_{ext} = 1/2 \rho A C_p V_w^3 e \quad (1)$$

$$V_w = V_0 \cos(\theta_{ye}),$$

onde,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área do rotor,  $C_p$  é o coeficiente de potência,  $V_w$  é a velocidade do vento perpendicular ao plano do rotor,  $V_0$  é a velocidade livre do vento e  $\theta_{ye}$  é o erro do ângulo de *yaw*. Porém, Song et al. (2018b), afirmam que a relação do erro de *yaw* não pode ser representada conforme em (1), pois  $P_{ext}$  é representado por uma relação não linear com  $\theta_{ye}$ , como apresentado em:

$$P_{ext} = 1/2 \rho A C_p V_0^3 \cos^k(\theta_{ye}), \quad (2)$$

onde o fator  $k$  corresponde a um parâmetro ajustável por meio de ensaio em túnel de vento que considera as perdas de energia provocadas pelo desalinhamento de *yaw*. Além disso, em (Bossany, 2019) é informado que não é válido afirmar que a potência diminui na proporção de  $\cos^3(\theta_{ye})$  e algumas referências sugerem  $k$  como sendo um fator entre 1,4 a 2 (Bossany, 2019). Validando essa informação e com base em simulações em túnel de vento realizado para a turbina de 5 MW estudada pela NREL esse fator corresponde a 1,88 (Gebraad, Pieter Mo et al, 2016) e (Annoni, Jennifer et al, 2018). Com isso, nas análises realizadas nesse artigo, com uma turbina de potência nominal dessa mesma ordem de grandeza,

foi considerado o fator de 1,88 para estimar a potência extraída do vento e, conseqüentemente, a energia líquida gerada pela turbina.

A equação (2) mostra que quanto menor é o erro de *yaw*, maior é a potência extraída do vento. Sendo assim, justifica-se a importância dos estudos relacionados ao sistema de controle de *yaw* em turbinas eólicas.

### 2.2 Controle de Yaw

O algoritmo de controle de *yaw* da turbina eólica de 1,5 MW fabricada pela China Ming Yang (Song et al. 2018) é ilustrado na Fig.1 e apresenta quatro etapas. Na primeira etapa, o erro de *yaw* é calculado por três médias móveis com períodos de 10, 30 e 60s, que pode ser adaptado para diferentes situações. Com isso, três erros médios de ângulo de *yaw* são obtidos,  $\theta_{ye}^{10s}$ ,  $\theta_{ye}^{30s}$  e  $\theta_{ye}^{60s}$ , respectivamente. Na etapa seguinte, os erros médios produzidos na etapa anterior são comparados com três *threshold* de amplitude predefinidos (Ah1, Ah2 e Ah3), conforme Tabela 1. Quando qualquer uma das condições “maior que” for satisfeita e o tempo de sustentação for maior do que o *threshold* correspondente, Th1, Th2 e Th3, respectivamente, conforme Tabela 1, a malha de controle prossegue para a etapa 3. Caso contrário, o algoritmo de controle é encerrado para este ciclo. Nessa etapa 3 é calculado o tempo de movimentação da turbina eólica. Esse tempo de acionamento da turbina é calculado usando a média correspondente ao erro de *yaw* dividido pela velocidade de *yaw* máxima e, por fim, na Etapa 4 o movimento da turbina é ativado com a duração dada pela Etapa 3. A nacela se movimenta para alinhar a turbina frontalmente à direção do vento.

Tabela 1. Parâmetros usados no controle de yaw MY

Parâmetros	Ah1	Ah2	Ah3	Th1	Th2	Th3
Valores	13°	10°	8°	10s	5s	5s

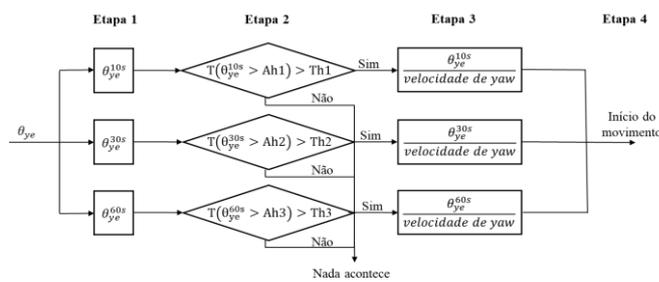


Fig.1 Algoritmo do sistema de controle de yaw MY.

Esse controle utiliza três malhas de controle de banda morta de posição e tempo e o acionamento se dá em ciclos com apenas uma malha atuando por vez. No entanto, esse artigo propõe uma sobreposição dos sinais dessas três malhas de controle e com base nisso, foram desenvolvidos e analisados cinco controles, que são apresentados de forma mais detalhada na seção 3.

### 2.3 Sistema de Acionamento de Yaw

Geralmente, o motor usado em sistema de controle de *yaw* em turbinas eólicas é o motor de indução alimentado

diretamente pela rede com um torque de partida apresentando uma componente oscilatória de alta frequência e, em princípio, tem controle de posição pouco preciso. Para avaliar os transitórios de alta frequência exige-se passos de integração da ordem de milissegundos ou menor que tornam o estudo quase inviável para análise de tempo de 24h de operação da turbina.

Em controles de posição mais modernos, usam-se sistemas de acionamentos com controle de posição baseados em motores síncronos ou de indução acionados por conversores de frequência que permitem respostas mais precisas e rápidas de posição. Então, por simplicidade e modernidade, adotou-se nos estudos para o controle de *yaw*, um motor acionado por conversor de frequência, que permite modelagem similar ao de motor de corrente contínua.

O diagrama de bloco da Fig. 2 representa o modelo base dos controles de *yaw* implementados. O sinal de entrada do controle é a direção do vento absoluta, que corresponde à soma da posição da nacela em relação ao norte geográfico,  $\theta_n$ , com o erro de *yaw*,  $\theta_{ye}$ . O sinal realimentado é o ângulo de *yaw* da nacela e a saída do controlador é o sinal de comando de torque para o motor de *yaw*.

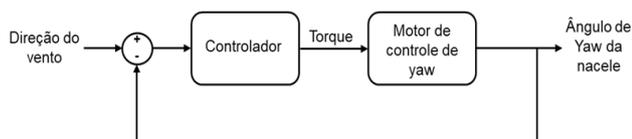


Fig. 2 Diagrama de bloco do controle de *yaw*.

O modelo dinâmico do motor de *yaw* e a incorporação dele no algoritmo de controle, permite estimar o gasto de energia para mover a turbina. Com essa análise, é possível estimar a geração líquida de energia para cada controle implementado.

#### 2.4 Dados de medição

Os dados reais a cada 1 s utilizados para um período de 24h registrado pelo sistema de medição de uma turbina eólica correspondem à posição da nacela em relação ao norte geográfico (*yaw*),  $\theta_n$ , e a direção do vento relativa ao eixo da turbina o qual é o erro de *yaw*,  $\theta_{ye}$ . A Fig. 3 mostra o princípio de medição da direção absoluta do vento fornecido pelo sensor de direção do vento instalado na nacela. Para avaliar os controles propostos, a direção absoluta do vento é dada pela soma das duas grandezas medidas:

$$\theta_v = \theta_{ye} + \theta_n \quad (3)$$

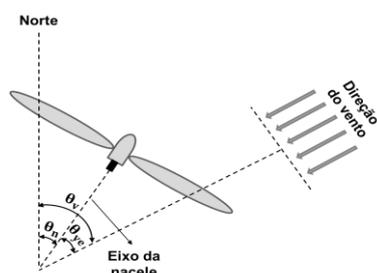


Fig. 3 Diagrama da medição da direção do vento.

O sistema de medição também fornece a velocidade do vento, a qual é utilizada em (2), juntamente com a saída do controle de *yaw*, para estimar a potência gerada pela turbina.

### 3. PROPOSTAS PARA CONTROLE DE YAW

#### 3.1 Controle de Yaw Ideal - CYI

O CYI permite estimar a energia líquida para o caso em que a turbina eólica está sempre frontal à direção do vento. Ou seja, a turbina se alinha instantaneamente em relação ao vento. Neste caso, assume-se que o motor de controle de *yaw* tem potência e velocidade de *yaw* ilimitada (ideal) e capaz de mover a nacela instantaneamente. O diagrama de bloco do CYI está ilustrado na Fig. 4, em que pode ser observado dois controladores Proporcional e Integrais (PI's). O bloco  $PI_v$  atua na malha interna, que controla a velocidade e outro, na malha externa,  $PI_p$ , controla a posição. Para modelar esses controladores foi utilizado o método de amplitude ótima para o PI da malha interna e simétrico ótimo para malha externa. Os cálculos dos parâmetros dos controladores apresentados na Tabela 2 foram realizados usando como referência Frohr e Friedrich (1990). O torque de carga,  $T_L$ , foi estimado para exigir 60% da capacidade do motor de controle de *yaw*, portanto,  $1,5 \times 10^6 \text{Nm}$ .

Dentro do retângulo tracejado está representado o modelo do motor de controle de *yaw* e os valores do momento de inércia equivalente,  $J$ , constante de atrito equivalente,  $K_a$ , e constante de torque do motor de controle de *yaw*,  $K$ , estão dados no Apêndice A. Os parâmetros usados nos estudos constam no manual da turbina de 5 MW da NREL (Jonkman, 2009) e os dados do sistema de *yaw* estão especificados em Kooijman, H. J. T. et al, 2003. Para o cálculo dos parâmetros equivalentes de momento de inércia e constante de atrito do sistema de *yaw* (turbina eólica + motor de *yaw*) é necessário ter conhecimento de parâmetros mecânicos específicos do motor, que não foram encontrados nas referências citadas. Aqui, foram utilizados os parâmetros de um motor de 20 hp para a avaliação do controle e a memória de cálculo de todos esses parâmetros estão detalhados no Apêndice A.

Tabela 2. Parâmetros do motor e dos controladores PI's

Nome	Símbolo	Valor
Ganho proporcional do PI de posição	$K_{pp}$	1,83 1/s
Ganho integral do PI de posição	$I_p$	0,671/s <sup>2</sup>
Ganho proporcional do PI de velocidade	$K_{pv}$	3048,22 As
Ganho integral do PI de velocidade	$I_v$	990,37 As

#### 3.2 Controle de Yaw Ideal com Limitação de Velocidade - CYIL

O controle anterior tinha como principal objetivo calcular o máximo de energia que uma turbina eólica poderia idealmente gerar caso fosse possível movimentá-la com a mesma velocidade da mudança da direção do vento, sem limitar a capacidade do motor. No entanto, com o intuito de

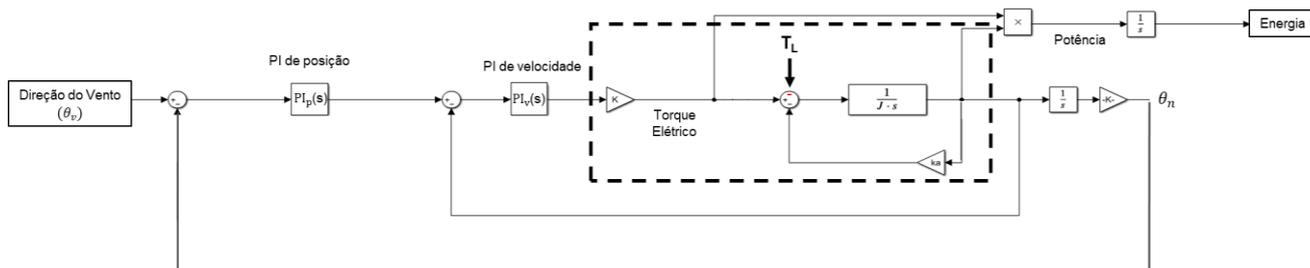


Fig. 4 Diagrama de bloco do controle yaw ideal (CYI).

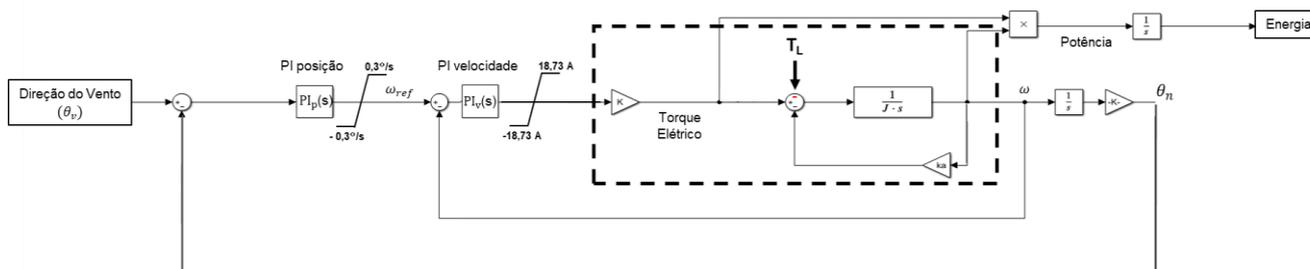


Fig. 5 Diagrama de bloco do controle ideal com limitação de corrente (CYIL).

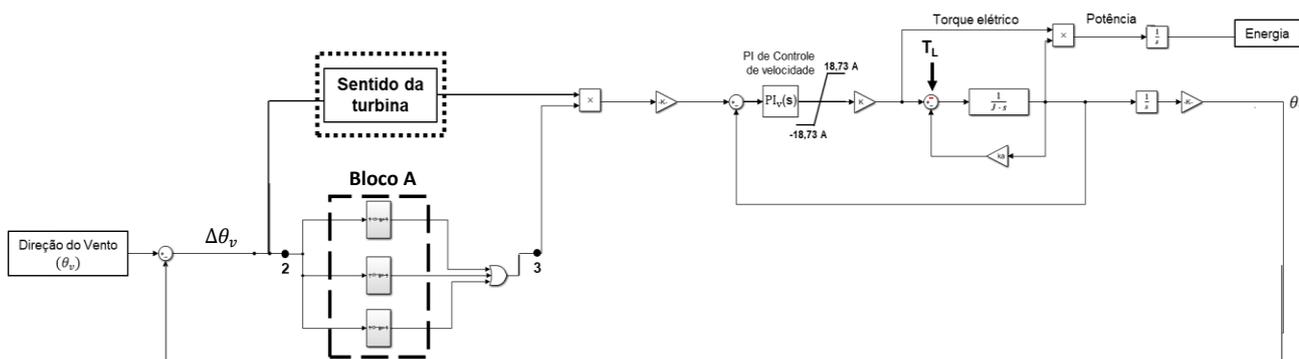


Fig. 6 Diagrama de bloco do controle com banda morta de posição (CYP).

elaborar um sistema de controle de yaw que reproduza de forma mais coerente com a atuação de uma turbina eólica real na busca pelo alinhamento com direção do vento, é preciso considerar as características técnicas do motor de yaw, tais como o torque nominal do motor e a taxa máxima de variação de ângulo de yaw,  $\omega_{m\acute{a}x}$ .

Portanto, para o CYIL foi considerada a taxa máxima de variação de ângulo de yaw de  $0,3^\circ/s$  (JONKMAN, Jason et al., 2009) e, com isso, os controladores proporcional/integral (PI) foram projetados para limitar a velocidade nessa taxa. Para limitar a velocidade é realizado o controle do torque por meio da limitação de corrente em seu valor nominal de 18,73 A, para o motor escolhido e calculada no Apêndice A, mantendo a entrada do controle e modelagem do motor do CYI.

Dessa forma, o controle de yaw ideal com limitação de velocidade (CYIL) implementado e representado na Fig. 5 é uma evolução do controle anterior, mas, ainda assim, sem restringir a frequência de acionamento.

### 3.3 Controle de Yaw com banda morta de Posição - CYP

O CYP é semelhante ao CYIL, quanto ao projeto dos controladores PI's. Seu objetivo é reduzir o número de acionamento do motor e, por isso, foram consideradas três bandas mortas de posição.

Para definir as bandas mortas de posição desse controle foram avaliadas as combinações de uma, duas e, por fim, três bandas mortas para uma faixa de ângulo entre  $0^\circ$  a  $20^\circ$ , com o intuito de melhorar a geração da turbina. Então, a melhor combinação que maximizou a geração está resumida na Tabela 3.

Tabela 3: Definição das bandas mortas de posição

Parâmetros	Ah1	Ah2	Ah3
Valores	$15^\circ$	$12^\circ$	$10^\circ$

Para acionar o motor de yaw, o desalinhamento da turbina deve ser maior que um  $\Delta\theta$  em relação à direção do vento, em que  $\Delta\theta$  corresponde bandas mortas de posição Ah1, Ah2 e Ah3

da Tabela 3. O algoritmo das bandas mortas está ilustrado na Fig. 7 e localizado no retângulo tracejado (Bloco A) da Fig. 6.

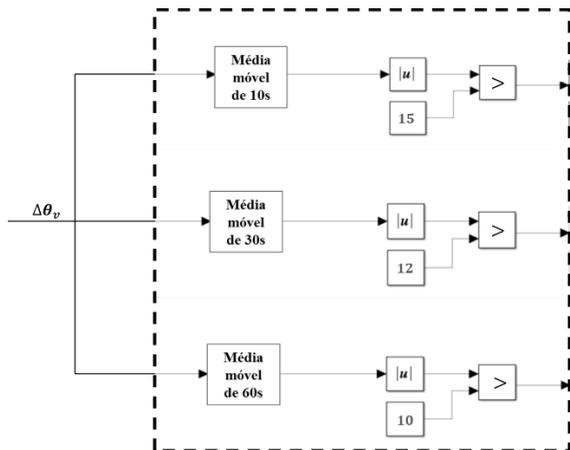


Fig. 7 Algoritmo de banda morta de posição do CYP (Bloco A da Fig. 6)

### 3.4 Controle de Yaw com banda morta de Posição e Tempo 1 – CYPT1

O diagrama de bloco do CYPT é semelhante ao diagrama do CYP, diferindo somente em relação ao acréscimo da banda morta de tempo. Nesse controle a banda morta de posição e tempo foi baseada nos dados da literatura e correspondem aos valores da Tabela 1 e o seu algoritmo pode ser avaliado na Fig. 8. Esse controle possui um controlador PI, modelado pelo critério da amplitude ótima e, além de controlar a velocidade em  $\omega_{m\acute{a}x}$ , foi projetado para limitar a corrente em 18,73 A. O acréscimo da banda morta de tempo permite que a turbina se movimente apenas se ela mantiver erro de yaw acima de um  $\Delta\theta$  por mais de um  $\Delta t$ .

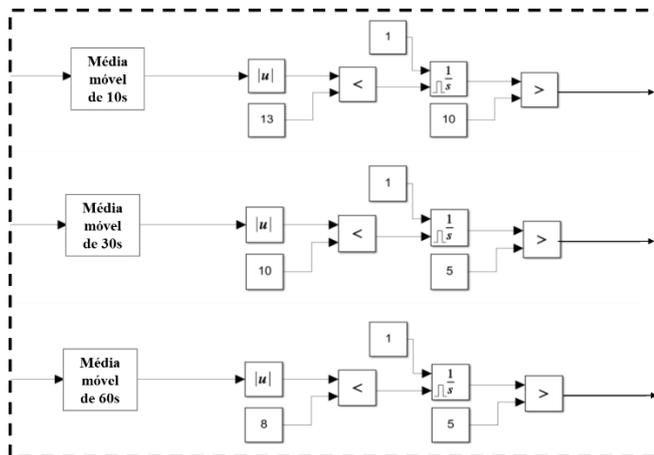


Fig. 8 Algoritmo da banda morta de posição do CYPT1.

Fazendo a análise do perfil do vento, foram verificadas muitas variações na sua direção durante o período de 24h. Como o alinhamento de uma turbina real não é instantâneo, ou seja, leva um tempo para se posicionar na direção do vento, essa modificação no controle evita o acionamento da turbina para variação de posição em períodos muito curtos, consequentemente, reduz o número de atuações do controle e, consequentemente, reduz o gasto de energia para mover essa

turbina no período considerado e, principalmente, reduz o desgaste mecânico.

### 3.5 Controle de Yaw com banda morta de Posição e Tempo 2 – CYPT2

Com o intuito de obter resultados similares a casos reais onde o número de atuações dos motores é menor que o obtido com CYPT1, as bandas mortas deste CYPT1 foram ajustadas para que a geração de energia e o número de atuações do controle diminuíssem. Esse ajuste foi realizado por tentativa e erro e os valores da Tabela 1 foram substituídos pelos valores da Tabela 4.

Tabela 4. Redefinição dos parâmetros do controle MY

Parâmetros	Ah1	Ah2	Ah3	Th1	Th2	Th3
Valores	15°	12°	10°	10s	5s	5s

## 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

### 4.1 Comparação em termo de número de atuações dos controles

Os dados disponíveis da empresa não são suficientes para que os resultados de energia gasta e energia líquida entrem em comparação com os controles implementados supracitados. Então, a comparação com dados da Voltalia foi realizada somente em relação a energia gerada, sem considerar a estimativa de energia gasta para mover a turbina. As demais análises, energia gasta e energia líquida, são realizadas e comparadas para os cinco controles apresentados na seção 3.

Essa seção apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações dos controles implementados na seção 3. Para os resultados ficarem mais claros de serem apresentados e comparados, os gráficos consideram uma janela de tempos de apenas 20 minutos (1220 s) desses dados, indo do instante de tempo de 40.000 s a 41.200 s dos dados adquiridos. A escolha desse período foi condicionada ao período em que se observou uma maior variação da direção do vento, portanto, seria mais clara a observação da atuação dos controles implementados. Para padronizar os gráficos, os resultados com o CYI estão em vermelho, com o CYIL em preto, com o CYP em azul, com o CYPT1 em verde, com o CYPT2 em magenta e, por fim, em azul turquesa, estão os dados reais medidos nomeado como referência.

Sendo assim, a primeira análise a ser apresentada é a comparação da saída do ângulo de yaw dos seis controles, exposta na Fig. 9, que corresponde ao sinal de referência do acionamento do controle de yaw. A importância desse estudo está em observar e comparar a frequência de atuação de cada tipo de controle e o gasto de energia para mover a turbina em função desta frequência de atuação.

Da Fig. 9 observa-se, em ordem decrescente de atuação, que o CYIL foi acionado 104 vezes, o CYP 42 vezes, o CYPT1 31 vezes, CYPT2 27 e o controle de referência 25 vezes. No controle ideal, CYI, a atuação é contínua.

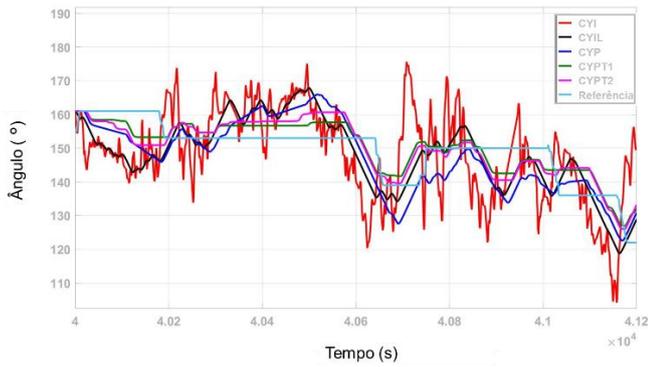


Fig. 9 Posição  $\theta$  de todos os controles.

#### 4.2 Comparação da energia gasta para mover a turbina

Em sequência, é comparado o gasto de energia para mover a turbina nos controles implementados, ilustrado na Fig. 10. Para ser possível comparar melhor os sinais dos controles CYIL, CYP, CYPT1 e CYPT2 (curvas preta, azul, verde e magenta, respectivamente), os resultados foram ampliados nos últimos 50s, conforme pode ser observado no tracejado interno da Fig. 10.

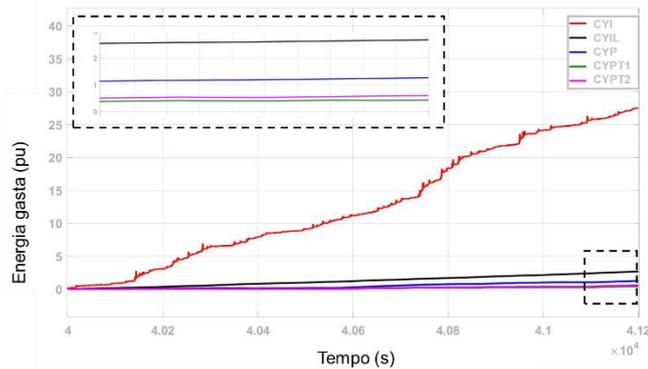


Fig. 10 Energia gasta dos controles CYI, CYIL, CYP, CYPT1 e CYPT2.

Na Fig. 10 é observado que o controle ideal apresentou o maior gasto de energia com 27,49 pu.s seguido dos controles CYIL com 2,68 pu.s (9,7% do caso ideal), CYP com 1,26 pu.s (4,58% do caso ideal) o CYPT1 com 0,6 pu.s (2,18%) e, por último, o CYPT2 com 0,43 pu.s (1,56% do caso ideal). Em síntese, a ordem decrescente dos controles para o gasto de energia é CYI, CYIL, CYP, CYPT1 e, por fim, CYPT2. Vale ressaltar, que esses resultados se referem ao final da janela de observação de 1.200 s, tendendo a se manter ao longo do período de 24h.

#### 4.3 Energia Gerada e Energia Líquida

Após análise do gasto de energia para mover a turbina durante o período considerado, é necessário investigar a energia gerada líquida (energia gerada em cada um dos controles menos a energia gasta) em cada controle para ser possível pontuar qual controle é mais indicado para maximizar a geração da turbina analisada. Para esse cálculo, foi investigada a geração da turbina para cada controle e essa análise é ilustrada nos gráficos da Fig. 11.

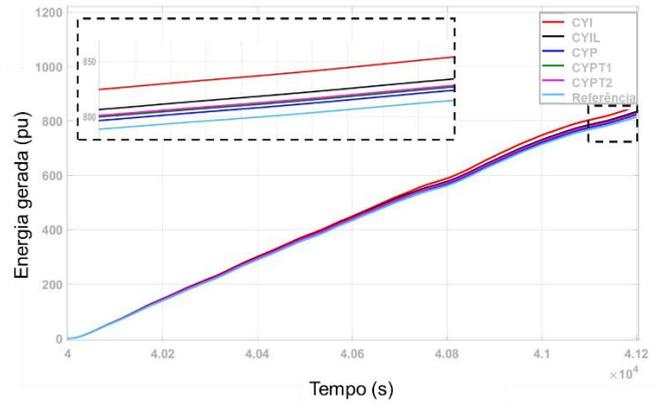


Fig. 11 Energia gerada para todos os controles.

O controle que apresentou maior geração foi o CYIL com uma energia líquida de 831,3 pu.s, seguido dos controles CYPT1 com 827,5 pu.s (com 0,46% a menos de energia líquida), controle de yaw ideal, CYI, com 826,4 pu.s (menos 0,59%), CYPT2 com 832,3 pu.s (0,6% a menos) e por fim, CYP com 822,5 pu.s (1% a menos energia líquida), como pode ser observado na Fig. 12 e Fig. 13. Apesar do controle de yaw ideal com limitação de velocidade de yaw apresentar uma energia líquida superior aos demais controles não se pode concluir que esse controle é o mais indicado, uma vez que, para inferir tal resultado é necessário avaliar o impacto do desgaste mecânico no sistema eólico, provocado pelo número superior de acionamentos desse controle em relação aos outros.

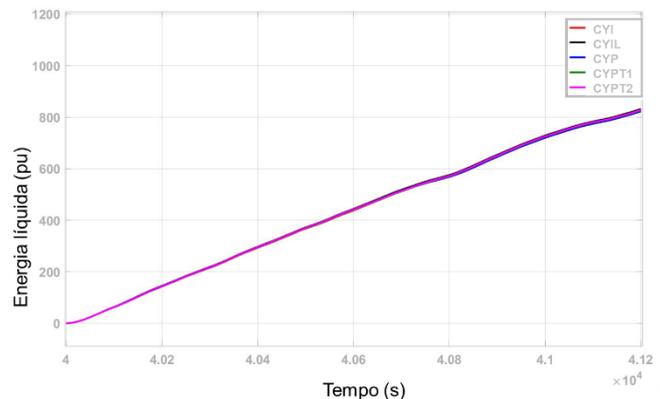


Fig. 12 Energia líquida dos controles CYI, CYIL, CYP, CYPT1 e CYPT2.

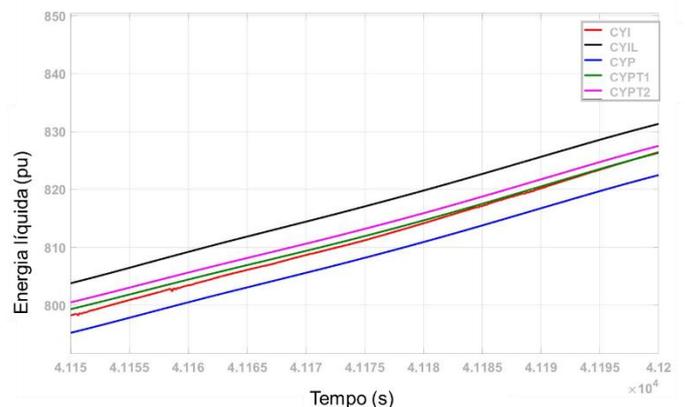


Fig. 13 Ampliação dos últimos 50s dos dados de energia líquida.

A Tabela 5 resume os resultados de energia gasta, gerada, líquida e número de atuações para cada controle desenvolvido e implementado nessa seção, considerando a janela de tempo de 1.200 segundos.

**Tabela 5: Resumo dos Resultados de Energia gasta, gerada, líquida e número de atuações**

Tipo de controle	Energia Gerada (pu.s)	Energia Gasta (pu.s)	Energia Líquida (pu.s)	Número de atuações
CYI	853,9	27,49	826,4	-
CYIL	834,0	26,83	831,3	104
CYP	823,7	1,27	822,5	42
CYPT1	828,1	0,60	827,5	31
CYPT2	826,8	0,43	826,3	27
Referência	814,6	-	-	25

A Tabela 5, mostra que o controle ideal com limite de velocidade (CYIL) é o que garante máxima geração líquida de energia, mas os motores do controle são acionados quase quatro vezes mais que o segundo colocado (CYPT1).

Os controles CYPT1 e CYPT2 são, comparativamente, semelhantes. O CYPT1 gera pouco mais de energia líquida, porém, o seu controle atua um pouco mais que o controle CYPT2. Se comparado com os dados reais da Referência, ele apresentou 1,66% de ganho de geração de energia. Esse ganho, apesar de parecer pequeno, é importante para as fazendas eólicas. Uma escolha entre CYPT1 e CYPT2 depende do estudo que mostre quanto os acionamentos repetidos afetam a vida útil da turbina devido à fadiga mecânica, por exemplo.

Vale notar que neste estudo foi considerado motores com controle de torque de forma que cada acionamento implica, basicamente, na aplicação de torque na forma de degraus. Ressalta-se que esta forma de onda de torque poderia ser suavizada para uma rampa evitando o “tranco” inicial do degrau e limitando os efeitos sobre a fadiga mecânica.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou três propostas de controle de yaw com banda morta de posição e posição e tempo, os quais foram comparados com dois casos ideais. Os resultados indicaram que, dentre as variações propostas, a que apresentou o maior ganho de energia líquida foi o CYPT1, apesar de ter um pouco mais de atuações que o CYPT2. Portanto, é possível ter um aumento de ganho de energia líquida em detrimento do número de atuações. A utilização dos dados de campo permite fazer o ajuste do controle para situação local ponderando entre esses dois quesitos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo CNPq (Proc. 309074/2019-3), FAPERJ (E-2/2021) e com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES-Brasil. Código de financiamento 001. E realizado com suporte da Voltalia em atendimento à Lei 9.991 de 24/07.2000 (P&D ANEEL).

## REFERÊNCIAS

Pérez, J. M. P., Márquez, F. P. G., Tobias, A., & Papaelias, M. (2013). Wind turbine reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 463-472.

Scholbrock, A., Fleming, P., Wright, A., Slinger, C., Medley, J., & Harris, M. (2014). Field test results from lidar measured yaw control for improved yaw alignment with the NREL Controls Advanced Research Turbine (No. NREL/CP-5000-63202). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Song, D., Yang, J., Fan, X., Liu, Y., Liu, A., Chen, G., & Joo, Y. H. (2018a). Maximum power extraction for wind turbines through a novel yaw control solution using predicted wind directions. *Energy conversion and management*, 157, 587-599.

Song, D., Fan, X., Yang, J., Liu, A., Chen, S., & Joo, Y. H. (2018b). Power extraction efficiency optimization of horizontal-axis wind turbines through optimizing control parameters of yaw control systems using an intelligent method. *Applied energy*, 224, 267-279.

Fröhr, Friedrich; Orthenburger, Fritz. (1990) Técnicas de controle eletrônico: controle automático para acionamentos reguláveis de corrente contínua. São Paulo: Nobel: Siemens S.A., 220-320.

Bossanyi, Ervin. Optimising yaw control at wind farm level. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019. p. 012023.

Gebraad, Pieter MO et al. Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—a CFD simulation study. *Wind Energy*, v. 19, n. 1, p. 95-114, 2016.

Annoni, Jennifer et al. Efficient optimization of large wind farms for real-time control. In: *2018 Annual American Control Conference (ACC)*. IEEE, 2018. p. 6200-6205.

## Apêndice A. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MOTOR

Neste apêndice é apresentada a memória de cálculo para os parâmetros utilizados nos controles implementados e apresentados na seção 3. Os parâmetros necessários para tais cálculos estão resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6. Variáveis do Controle**

Dados		
Velocidade do motor [rpm]	$n_{\text{motor}}$	1760
Velocidade da nacele [rpm]	$n_{\text{nacele}}$	0,05
Potência do motor de yaw [kW]	$P_{\text{yaw}}$	14,92
Tensão de linha do motor de yaw [V]	$V_l$	460
Momento de inércia da turbina em baixa rotação [ $kg\ m^2$ ]	$J_{\text{tur}}^{\text{br}}$	$2,6 \times 10^6$
Constante de amortecimento da turbina em baixa rotação [ $N \frac{rad}{s}$ ]	$K_{\text{tur}}^{\text{br}}$	$19,16 \times 10^6$

Para elaboração do controle foi considerado um sistema de controle de *yaw* tomando como referência ao lado de baixa rotação do sistema, o que é conseguido por meio de engrenagens com relação de transformação  $R_T$  e modelado por um momento de inércia equivalente em relação ao eixo de *yaw*. Esse momento de inércia equivalente considera as massas do conjunto turbina-pás-nacele e do motor de *yaw*. O modelo dinâmico que representa o sistema de controle de *yaw* pode ser escrito como:

$$J \frac{d\omega_n}{dt} = T_{ebr} - T_L - K_a \omega_n, \quad (4)$$

em que  $J$  é o momento de inércia equivalente,  $\omega_n$  é a velocidade angular da nacele em relação ao eixo de *yaw*,  $T_{ebr}$  é o torque eletromagnético referido ao lado de baixa rotação,  $T_L$  é o torque de carga e  $K_a$  é a constante equivalente de amortecimento do sistema. Foi assumido torque de carga de  $1,5 \times 10^6 \text{ Nm}$  e o torque eletromagnético pode ser escrito como,

$$T_{ebr} = R_T \cdot P_{yaw} / \omega_n \quad (5)$$

onde,  $P_{yaw}$  é a potência total dos motores do sistema de controle de *yaw* e  $R_T$  é a relação de transformação da caixa de engrenagem do sistema *yaw*, dada pela equação:

$$R_T = n_{motor} / n_{nacele} = 35200 \quad (6)$$

em que,  $n_{motor}$  é a velocidade do motor de *yaw* e  $n_{nacele}$  velocidade de rotação da nacele, ambos em rpm.

Para determinar a constante de torque do motor,  $K$ , foi utilizado a equação do conjugado elétrico e o fluxo,  $\Phi$ , foi considerado constante, sendo assim, temos que:

$$T_{cbr(máx)} = K' \Phi i_a = K I_{a(máx)} \quad (7)$$

em que,  $T_{ebr}$  é o torque elétrico referido ao lado de baixa rotação, dada pela equação:

$$T_{cbr(máx)} := P_{yaw} / \omega_n \times R_T = 2849,5 \text{ kNm} \quad (8)$$

e  $I_{a(máx)}$ , a corrente elétrica máxima.

Sabendo que a tensão de linha do motor é 460 V, é possível determinar a corrente máxima,  $I_{máx}$ , por meio da equação:

$$P_{yaw} = \sqrt{3} V I_{máx} \rightarrow I_{a(máx)} = 18,73 \text{ A} \quad (9)$$

Logo, podemos determinar  $K$ , por:

$$K = T_{cbr} / I_{a(máx)} = 152136 \text{ Nm/A}. \quad (10)$$

Sendo conhecida a relação de transformação,  $R_T$ , é possível determinar o momento de inércia e a constante de atrito equivalente do sistema de *yaw*,  $J$  e  $K_a$ , respectivamente.

Então, temos que:

$$J = J_{tur}^{br} + J_m^{br} \quad e \quad (11)$$

$$K_a = K_{tur}^{br} + K_m^{br}. \quad (12)$$

onde,  $J_{tur}^{br}$  é o momento de inércia da turbina e  $J_m^{br}$ , do motor de *yaw*, ambos em baixa rotação. Enquanto,  $K_{tur}^{br}$  é a constante de amortecimento da turbina e  $K_m^{br}$  é a constante de amortecimento do motor. Calculando essas variáveis, temos:

$$J_m^{br} = R_T^2 J_m = 123,9 \times 10^6 \quad e \quad (13)$$

$$K_m^{br} = R_T^2 K_a = 21,94 \times 10^6. \quad (14)$$

Fazendo as devidas substituições é possível determinar as variáveis do sistema que estão sintetizadas na Tabela 7.

**Tabela 7. Variáveis Calculadas do Controle**

Dados Calculados		
Relação de transformação	$R_T$	35200
Torque Elétrico [kNm]	$T_{ebr}$	2849,5
Corrente elétrica de projeto [A]	$I_{a(máx)}$	18,73
Constante do motor [Nm/A]	$K$	152136
Momento de inércia equivalente do sistema [ $kg \ m^2$ ]	$J$	$126,5 \times 10^6$
Constante de amortecimento equivalente do sistema [ $N \frac{rad}{s}$ ]	$K_a$	$41,1 \times 10^6$