

Sintonia de controladores para suporte de frequência com Gerador de Indução Duplamente Alimentado utilizando um método heurístico otimizado com Python e ATP

Manoelito Carneiro das Neves Filho,^{*}
Paulo A. Souza, Renan R. dos Santos,^{**}
Daniel Barbosa, Luciano Sales Barros.^{***}

^{*} *G-SEPi – IEEE PES UFBA, (e-mail: manoelito.filho@ufba.br),*
^{**} *UNIFACS (e-mail: paulo.andrade@unifacs.br),*
UFBA (e-mail: renan.rodrigues@ufba.br),
^{***} *UFBA (e-mail: dbarbosa@ufba.br), UFPB, (e-mail: lsalesbarros@gmail.com).*

Abstract: Electricity generation with low inertia offers operational risks due to the high frequency gradients in the face of network disturbances providing solutions to this problem is a major challenge today in such a way that this work presents a heuristic method to tune controllers that provide frequency support, through the concept of synthetic or virtual inertia, in a Doubly Fed Induction Generator wind turbine. The gains are tuned by optimizing a cost function using computational methods, using the Python programming language and the ATP (Alternative Transient Program) software as the calculation core. The control strategies implemented offered promising results because there was a significant improvement in the generation response.

Resumo: A geração elétrica com baixa inércia oferece riscos operacionais por conta dos altos gradientes de frequência frente à perturbações na rede e, para tal, prover soluções para este problema é um grande desafio na atualidade de tal modo que este trabalho apresenta um método heurístico para sintonizar controladores que provêm suporte de frequência, por meio do conceito de inércia sintética ou virtual, em um aerogerador duplamente alimentado (DFIG, do inglês *Doubly Fed Induction Generator*). Os ganhos são sintonizados mediante otimização de uma função custo através de métodos computacionais, uso da linguagem de programação Python e do software ATP (*Alternative Transient Program*) como motor de cálculo. As estratégias de controle implementadas ofereceram resultados promissores de modo que houve uma melhora significativa na resposta da geração.

Keywords: heuristic method; synthetic inertia; DFIG; ATP; optimization.

Palavras-chaves: método heurístico; inércia sintética; DFIG; ATP; otimização.

1. INTRODUÇÃO

A inércia é uma grandeza fundamental para garantir a estabilidade de frequência do Sistema Elétrico de Potência (SEP), sendo um grande desafio o desenvolvimento de soluções com suporte de frequência através da implementação do conceito de inércia sintética ou virtual. Diversas estratégias têm sido propostas para a implementação deste recurso (Bonfiglio et al., 2019) com intuito de prover melhora na resposta da geração elétrica frente a distúrbios e, conseqüentemente, na estabilidade de frequência da rede.

Como a geração eólica é predominantemente assíncrona, o aumento na penetração desta no SEP promove uma redução na inércia equivalente por este ser composto tradicionalmente por geração síncrona, assim, o SEP está vulnerável a uma maior flutuação da frequência da rede de modo que se faz necessário que sistemas de controle específicos atuem em tempo hábil (P. Rosa et al., 2021). A

baixa inércia promove altos gradientes de frequência frente à perturbações e, portanto, eleva o risco de violações dos limites operacionais de segurança definidos pelos operadores dos sistemas (Xi et al., 2016).

O sistema a ser controlado é uma máquina eletromecânica do tipo aerogerador duplamente alimentado, também conhecido como aerogerador DFIG (do inglês *Doubly Fed Induction Generator*). Assim como alguns tipos de máquinas elétricas, o aerogerador DFIG apresenta alta complexidade em sua modelagem proveniente da não-linearidade e do forte acoplamento entre alguns de seus elementos e grandezas (Aguilar, 2016; Barrios Aguilar et al., 2020), dificultando substancialmente determinados estudos a serem explorados que não podem fazer valer de aproximações e simplificações comuns. Este aerogerador foi escolhido por ser largamente utilizado em parques eólicos no mundo (Cortajarena et al., 2021).

Este trabalho propõe um método heurístico para sintonia de controladores com intuito de implementar suporte de frequência, por meio da teoria de inércia sintética ou virtual, em um aerogerador DFIG. Com os ganhos obtidos mediante otimização de uma função custo com foco na sintonia de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), através de métodos computacionais, com uso da linguagem de programação Python e do *software* ATP (*Alternative Transient Program*) como motor de cálculo.

Este artigo está dividido em 5 sessões. Sendo a primeira esta introdução, a Sessão 2 corresponde a contextualização do problema que descrevem conceitos para um melhor entendimento deste trabalho, tais como: característica do aerogerador, a inércia sintética e o suporte de frequência, os métodos heurísticos para sintonia de controladores PID e a otimização. A Sessão 3 explica a metodologia utilizada, os controladores propostos, a definição da função objetivo, o algoritmo de busca, o custo e o paralelismo computacional. A Sessão 4 descreve os resultados obtidos nas simulações e a Sessão 5 encerra com a conclusão.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Características do Aerogerador Modelado

Um aerogerador DFIG é constituído, basicamente, por um gerador assíncrono de rotor bobinado, que tem tanto o estator como o rotor conectados à rede, sendo a conexão deste último através de conversor CA/CC/CA que não possui a capacidade de responder às mudanças de frequência da rede (Yang et al., 2019). A representação desta máquina pode ser observada na Figura 1.

A modelagem utilizada neste trabalho foi desenvolvida utilizando o *software* ATP por meio de componentes descritos na literatura, com uso intensivo da ferramenta MODELS (Dubé, 1996). Os sistemas de controle, o modulador PWM (do inglês, *pulse width modulation*) e o modelo matemático da turbina eólica foram considerados neste estudo com detalhamento completo em (Souza, 2003). Os parâmetros do aerogerador modelado no ATP constam na Tabela 1.

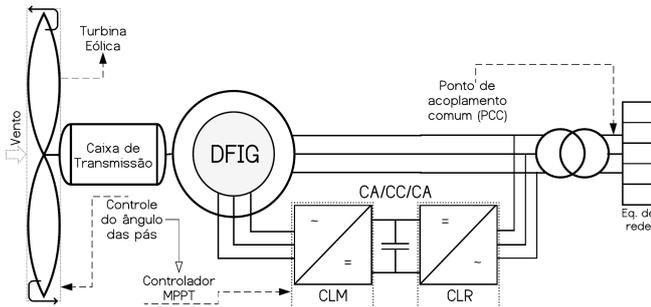


Figura 1. Topologia DFIG.

2.2 Inércia Sintética e Suporte de Frequência

De maneira simplificada, o termo inércia sintética pode ser utilizado para introduzir a ideia de uma resposta e um comportamento não natural para o suporte de frequência, de modo que a energia cinética acumulada pelas pás da turbina eólica pode ser aproveitada para prover suporte

Tabela 1. Parâmetros do Aerogerador.

Parâmetros	Valor
Potência e Tensão nominal	2 MW e 690 V
Frequência nominal	60 Hz
Resistência estatórica	0,002381 Ω
Indutância estatórica	1,9576 $\cdot 10^{-3}$ H
Resistência rotórica	0,002381 Ω
Indutância rotórica	1,9448 $\cdot 10^{-3}$ H
Indutância mútua	1,8944 $\cdot 10^{-3}$ H
Pares de polos	2
Velocidade do rotor	9 – 21 rpm
Momento de inércia total	5,9 $\cdot 10^6$ kg \cdot m ²
Vento <i>cut-in</i> nominal <i>cut-out</i>	4 m/s 12 m/s 25 m/s
Densidade do ar	1,225 kg/m ³
Coefficiente de pot. máximo	0,42
Constante de inércia (Ht)	4,2 s

de frequência primária e o seu comportamento inercial natural pode ser percebido a partir de (1).

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J_n \cdot (\omega_{r1}^2 - \omega_{r0}^2). \quad (1)$$

Sendo ΔE a variação da energia cinética em Joule, J_n o momento de inércia natural dado em kg \cdot m² e ω_r a velocidade angular rotórica dada em rad/s. Dado um pequeno instante, ω_{r0} é a velocidade de referência para uma rápida mudança percebida em ω_{r1} , sendo $\delta\omega_r$ uma pequena perturbação, conforme visto em (2).

$$\omega_{r1} = \omega_{r0} \pm \delta\omega_r. \quad (2)$$

Deseja-se simular a resposta inercial em uma máquina assíncrona tal qual síncrona, assim, pode-se atribuir a mesma equação da conservação de energia para velocidade estatórica com inserção da grandeza de momento de inércia sintética ou virtual, conforme visto em (3).

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot (\omega_{s1}^2 - \omega_s^2) = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot ((\omega_s + \delta\omega_s)^2 - \omega_s^2). \quad (3)$$

Sendo J_v o momento de inércia sintética ou virtual, ω_s a frequência da rede e $\delta\omega_s$ uma pequena perturbação nesta. Igualam-se as equações (1) e (3) para obter J_v em função das velocidades angulares e do momento de inércia natural. Assume-se a teoria de pequenos distúrbios com $2 \cdot \omega_{r0} \gg \delta\omega_r$ e $2 \cdot \omega_s \gg \delta\omega_s$ e tem-se (4).

$$J_v = J_n \cdot \frac{(2 \cdot \omega_{r0} + \delta\omega_r) \cdot \delta\omega_r}{(2 \cdot \omega_s + \delta\omega_s) \cdot \delta\omega_s} \approx J_n \cdot \frac{\omega_{r0} \cdot \delta\omega_r}{\omega_s \cdot \delta\omega_s}. \quad (4)$$

Pode-se perceber que o momento de inércia sintética ou virtual, percebido a partir da variação da energia cinética extraída das massas gigantes rotóricas, não depende somente do momento de inércia natural, mas também é proporcional à frequência rotórica e cresce proporcionalmente à variação de velocidade do rotor. Este fenômeno corresponde a um comportamento no aerogerador DFIG em um curto espaço de tempo, de maneira que J_v pode ser muito maior que J_n quando comparado com uma resposta do gerador síncrono (Ochoa and Martinez, 2017).

2.3 Métodos Heurísticos par Sintonia de Controladores PID

A técnica de controle PID é a estratégia de controle mais implementada no aerogerador DFIG, com maior incidência para ações proporcionais e integrativas (Aguilar, 2016). Os métodos heurísticos para sintonia dos controladores PID são baseados na experiência empírica por sensibilidade, ensaios, conhecimentos do sistema e se consolidam em sistematizar metodologias ou conjuntos de regras que auxiliam a sintonia desejada. Por definição, as técnicas heurísticas não garantem a exatidão da solução ótima, tampouco nenhuma espécie de tendência ou aproximação para caso exista tal solução.

Contudo, podem existir soluções, ou família de soluções, que ofereçam regiões factíveis satisfatórias, operacionais e possíveis. Todavia, há um progresso contínuo no desenvolvimento de métodos de otimização de forma a determinar com eficiência e garantia de soluções ótimas para os problemas propostos junto aos métodos heurísticos (Gaspar Cunha et al., 2012).

2.4 Otimização

Este trabalho propõe utilizar um método heurístico computacional para otimizar uma função custo que envolve a sintonia do controlador PID através da representação do problema expresso em (5), (6) e (7).

$$\mathbf{x} = \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}); \quad (5)$$

$$s.a. : \{ g_i(x) \leq s_i; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$J(\mathbf{x}) = I_k(e(t)). \quad (7)$$

Sendo \mathbf{x} o argumento que minimiza a função, também conhecido como vetor de variáveis de decisão, que produz o(s) valor(es) mínimo(s) da função objetivo, tal que tem-se $x^T = [K_p \ K_i \ K_d]$, sendo estes, respectivamente, os ganhos proporcional, integral e derivativo. Já $I_k(e(t))$ é um número real e maior que zero que representa um índice de desempenho para minimização do sistema. A função erro, $e(t)$, é definida pelo desvio do modelo de referência $r(t)$ entre a saída do sistema $y(t)$, dado o sinal de controle $u(r(t) - y(t))$.

Por se tratar de um sistema físico e de modo a preservar a factibilidade das soluções, consideram-se $g_i(t)$ como funções de restrições do problema, s_i o limite superior e n o índice correspondente a enésima restrição para implementação apropriada da inércia sintética.

3. METODOLOGIA

O aerogerador DFIG funciona em sincronia com a rede elétrica através do conversor *back-to-back*: que não possui a capacidade de responder às mudanças de frequência pois seu rotor está completamente desacoplado da frequência da rede (Yang et al., 2019). Diversos cenários foram simulados para provocar a variação da frequência da rede, desde grandes variações no vento, perturbações repentinas

no balanço entre geração e carga e também distúrbios na rede (Barrios Aguilar et al., 2020; Souza et al., 2020). Deste modo, a perturbação escolhida para provocar a instabilidade da frequência no aerogerador será um curto-circuito trifásico equilibrado no ponto de conexão comum (PCC) para gerar um grande desequilíbrio entre a potência gerada e a demandada conforme pode ser visto em (8).

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_m - P_e}{2 \cdot H}. \quad (8)$$

Sendo f a frequência do aerogerador, P_m a potência mecânica, P_e a potência elétrica demandada pela carga e H a constante de inércia do aerogerador. Percebe-se então que a variação da frequência durante uma perturbação, também conhecida como Taxa de Mudança de Frequência (ROCOF, do inglês *Rate of Change of Frequency*), é diretamente proporcional ao balanço de potência ativa e inversamente proporcional à inércia do sistema.

Como as turbinas eólicas têm uma quantidade significativa de recursos inerciais rotóricos, proveniente das massas girantes de suas grandes pás, deseja-se que a inércia sintética atue e ajude a diminuir o ponto de maior desvio da frequência após o distúrbio, também conhecido como frequência *nadir*, assim, algumas modificações nos sistemas de controle existentes podem ser propostas de modo a prover o suporte de frequência ao aproveitar as massas girantes frente à uma perturbação.

3.1 Malhas de Controle e Alterações Propostas

O controlador do lado da máquina (CLM) e o controlador do lado da rede (CLR) estão apresentados na Figura 1. O CLM aciona o conversor que alimenta o circuito do rotor, sendo responsável pelo controle da potência ativa da máquina e, conseqüentemente, durante os transitórios, também da sua frequência de operação. Já o CLR tem função principal de controlar o nível de tensão do barramento CC, que é fundamental para estabilização e perfeita operação da máquina. Os diagramas detalhados podem ser conferidos em (Souza et al., 2019).

As alterações nas malhas de controle consistirão em chavear os controladores, sob condição de existir um desvio de frequência, para trabalhar junto à malha do controlador MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*, que é responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência. O controlador MPPT recebe a potência ativa de referência (P_{ref}) a partir do controle responsável em comandar o ângulo das pás, também conhecido como controlador *pitch*, de modo que o controlador MPPT atua para otimizar o torque em relação à incidência do vento e esta representação pode ser vista na Figura 1.

Alguns métodos propostos para implementação do controle de inércia sintética utilizam estratégias de sintonia dos controladores para as condições de vento abaixo e acima da velocidade nominal e, deste modo, explorar diferentes características de operação (Yang et al., 2019) que influenciam no fluxo de potência em diferentes cenários. Por este trabalho focar no método de sintonia dos controladores em si, considera-se o vento constante com de velocidade nominal. Todavia, a robustez para diferentes condições de vento, assim como mudança no equivalente

de rede, a partir dos controladores descritos e sintonizados pelo método heurístico proposto neste trabalho, tiveram seus resultados publicados em (Souza et al., 2020).

Todas as estratégias de controle propostas atuarão e serão chaveadas para quando a frequência experimentar um desvio maior ou igual $0,05\text{ Hz}$. As estratégias exploram a combinação das grandezas de interesse, frequência e potência ativa, para prover a inércia sintética através da ROCOF (desvio de frequência) e do desequilíbrio carga-geração, atuando nas correntes rotóricas e, conseqüentemente, no controlador *pitch* para aproveitar a energia cinética acumulada pelas pás da turbina e seus recursos inerciais rotóricos.

Controlador 1: Esta primeira estratégia desativa o controlador MPPT para atuação exclusiva do controle de inércia sintética e manterá o uso do sinal do erro de potência para a devida atuação conforme visto na Figura 2. Em outras palavras, através de um chaveamento, há uma substituição do controlador MPPT pelo Controlador 1, dada as particularidades discutidas na Seção 2.3. Deste modo, o Controlador 1 receberá a potência de referência através do controlador *pitch* e, dada a potência medida, atuará para prover potência ativa e, conseqüentemente, suporte de frequência.

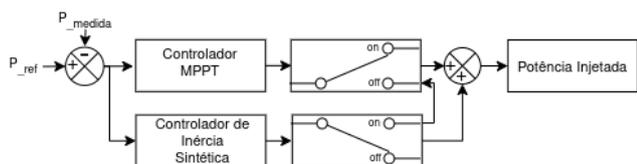


Figura 2. Diagrama que representa o Controlador 1.

Controlador 2: Esta estratégia também desativa o controlador MPPT, contudo faz uso do sinal de erro de frequência como sinal de entrada para o controlador (Figura 3). Apesar da variação de frequência ser representada em função do desbalanço entre potência mecânica e potência elétrica, conforme apresentado na Equação 8, faz sentido explorar o desvio de frequência pois sabe-se que a referência sempre será a frequência nominal da rede (60 Hz) e, deste modo, diferente da estratégia anterior, que recebe a referência do controlador *pitch*, basta comparar a frequência medida e extrair o sinal de erro para atuar conforme a sintonia do PID.

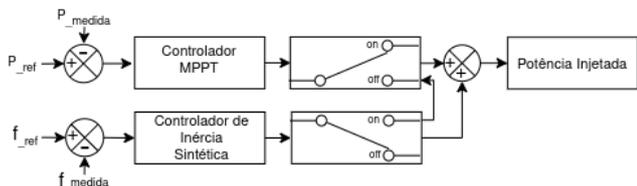


Figura 3. Diagrama que representa o Controlador 2.

Controlador 3: Diferente das estratégias anteriores, esta estratégia de controle manterá o controlador MPPT durante toda a operação e atua em conjunto ao controle de inércia sintética. O propósito desta estratégia é preservar o controlador MPPT e analisar a resposta ao simplesmente adicionar uma nova malha de controle que fará uso do erro de frequência como sinal de entrada do controlador, de maneira similar ao controlador 2, conforme visto na Figura

4. Esta estratégia é interessante para ser analisada pois, ao manter o controlador MPPT ativo e injetar a potência ativa necessária para o suporte de frequência, através de uma nova malha de controle, esta mudança ainda será percebida pelo MPPT através da potência ativa medida de forma que ele se adaptará dada as condições de atuação do controlador de inércia sintética.

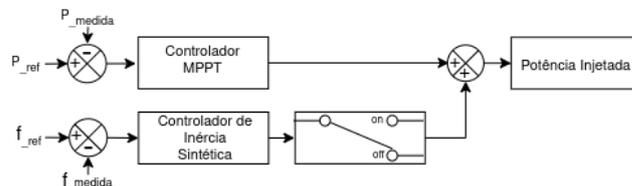


Figura 4. Diagrama que representa o Controlador 3.

Uma vez entendido os propósitos, funções e topologia dos controladores propostos, se faz necessário sintonizá-lo a partir da definição de suas funções objetivo.

3.2 Definição da Função Objetivo

Para prover satisfatoriamente o suporte de frequência, a sintonia dos ganhos K_p , K_d , e K_i , para as três estratégias apresentadas, se deu através da minimização da função custo sujeita às restrições, conforme visto em (9) e (10).

$$\min \sum_{t=t1}^{t2} |f_{60\text{Hz}} - f(t)|; \quad (9)$$

$$s.a. : \begin{cases} I_{r_q} \leq 4kA; \\ I_{r_d} \leq 4kA; \\ V_{cc} \leq 1.6kV. \end{cases} \quad (10)$$

Sendo $t1$ e $t2$ o intervalo de tempo de interesse para avaliar a resposta do sistema, $f(t)$ a frequência calculada em cada instante de tempo, I_{r_q} e I_{r_d} as correntes rotóricas após a transformada de Park e V_{cc} a tensão do barramento CC que é responsável pela estabilidade da máquina. Os detalhes que foram considerados para a sintonia dos controladores serão discutidos na próxima sessão.

3.3 Algoritmo de Busca para Sintonia

Existem duas classes de método de busca: a busca informada e a busca desinformada (Freitas, 2017). Para esta situação, a busca desinformada se faz coerente por se tratar de um modelo em caixa cinza, em que não há informações detalhadas suficientes sobre as características ou comportamento do novo sistema em malha fechada após a inserção das três novas estratégias de controle.

Desta maneira, optou-se por um algoritmo que faz uso da busca por força bruta em camadas, de forma a extrair os valores que minimizam a função objetivo desejada diretamente da simulação dinâmica calculada pelo *software* ATP e, através das respostas frente a cada simulação executada, pode-se encontrar e explorar diversas regiões operacionais possíveis para, através destas, refinar a sintonia com inuito de encontrar novas regiões a fim de obter resultados cada vez mais satisfatórios e factíveis. A representação deste algoritmo pode ser visto na Figura 5.

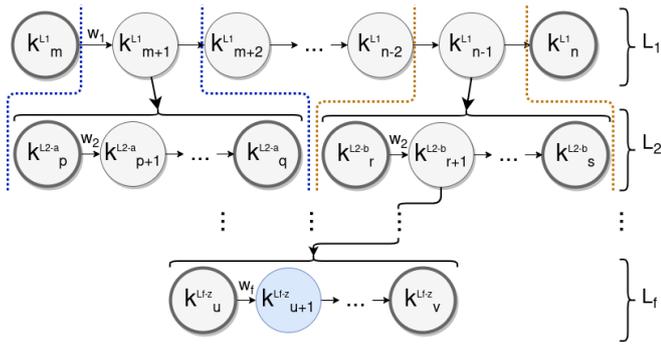


Figura 5. Diagrama do algoritmo de busca.

Seja $L_1 = \{k_m^{L_1}, k_{m+1}^{L_1}, k_{m+2}^{L_1}, \dots, k_{n-2}^{L_1}, k_{n-1}^{L_1}, k_n^{L_1}\}$ o vetor linha correspondente a primeira camada de busca, w_1 a distância entre os seus elementos, também definido como passo de busca, de valor contante $|k_{m+1}^{L_1} - k_m^{L_1}|$ para a busca em cada camada, o elemento k representa um dos ganhos K_p , K_i ou K_d de interesse, L_2, \dots, L_f as camadas inferiores com seus limites representado pelos elementos $k_m, k_n, k_p, k_q, k_r, k_s, k_u$ e k_v , seus respectivos passos de busca (w_2, \dots, w_f) com suas respectivas partições ($L_{2-a}, L_{2-b}, \dots, L_{f-z}$), sendo (a, b, \dots, z) os índices que representam cada partição.

Percorrer o vetor L_1 significa executar simulações com seus respectivos ganhos, dada uma das estratégias de controle apresentadas. Uma vez percorrida a primeira camada, o algoritmo busca os ganhos ao identificar regiões nas quais a função objetivo apresenta os menores valores (regiões de interesse), com base no índice de desempenho da minimização do sistema definido em (5), (7) e (9).

Na Figura 5 os elementos $k_{m+1}^{L_1}$ e $k_{n-1}^{L_1}$ caracterizam os ganhos que representam as partições de interesse, ou seja: que tiveram boas respostas para minimização da função objetivo, e estas partições estão destacadas em linha tracejada azul (L_{2-a}) e amarelo (L_{2-b}). Por conseguinte, novas buscas dentro dessas partições são efetuadas com um passo de busca menor ($w_2 < w_1$) e este processo é repetido até que não haja mais alteração no valor mínimo da função objetivo dado um passo de busca muito pequeno.

Primeiro busca-se o ganho proporcional (K_p), insere-o no controlador e repete o processo para o ganho derivativo (K_d) e depois para o ganho integrativo (K_i). Esta ordem foi empiricamente percebida melhor pois o ganho derivativo é o que mais influencia na obtenção de uma baixa frequência *nadir*, que tem peso considerável na função objetivo a ser minimizada, de modo a inferir se a estratégia de controle utilizada contribui para bons resultados na minimização da função objetivo com antecedência. A vantagem da ação derivativa na malha de controle também foi percebida em outros trabalhos (Gao and Preece, 2017; Dharmawardena et al., 2016).

Apesar do elevado custo computacional para sintonia, este método tem como vantagem a não necessidade do uso de derivadas da função objetivo por utilizar a própria resposta do sistema como imagem para penalização da função custo, de forma que é sintonizado o sistema não-linear completo, sem linearizações e simplificações.

3.4 Custo e Paralelismo Computacional

As escolhas do passo de busca e dos limites superior e inferior da primeira camada definirão a quantidade de simulações necessárias para percorrer os elementos nesta. Para as partições subsequentes os próximos passos de busca são decisivos, assim como o tamanho e quantidade de regiões de interesse. Na primeira camada utiliza-se, geralmente, como limites superiores e inferiores ± 30.000 com passo de busca de 500, dessa forma, excluindo a simulação para quando $k = 0$, tem-se 120 simulações.

Para as camadas subsequentes, o passo é definido por quem opera o algoritmo a depender do tamanho e quantidade de regiões de interesse identificadas. Geralmente para as partições subsequentes tem-se $w_{1,\dots,f} = [50, 5, 1, 0.01]$ e o passo de 0.01 só é executado como critério de refinamento e validação da não alteração da função custo. Na fase de desenvolvimento deste método, foram testados passos de busca na ordem de 10^{-4} sem jamais oferecer qualquer melhoria no índice de desempenho da minimização do sistema. Comumente obtém-se valores mínimos desejados com passo de busca unitário e utiliza-se $w_4 = 0.01$ para garantir que o ganho encontrado com $w_3 = 1$ seja um mínimo local.

Para a sintonia dos três controladores, foram executadas 2.104 simulações. Com o *software* ATP, cada simulação dura em média somente 53s, o que resulta em aproximadamente 31 horas no total. As simulações são executadas em paralelo pois o arquivo binário do ATP foi compilado para utilizar somente um núcleo do processador para cada cálculo, assim, com um processador *quad-core* (quatro núcleos) e o devido gerenciamento do sistema operacional e do interpretador Python, é possível executar uma simulação para cada núcleo. Todos os cálculos foram feitos em menos de 8 horas com uso de um notebook com um processador Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz, 16 Gb de memória RAM, armazenamento em unidade de estado sólido (SSD) e Microsoft Windows 10 Home Premium como sistema operacional.

4. RESULTADOS

Após execução do algoritmo proposto, obteve-se os ganhos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Ganhos dos Controladores.

Ganho	Controlador 1	Controlador 2	Controlador 3
K_p	2550	-15.000	10
K_d	10	1.500	5.500
K_i	10	-12.000	5

Para verificar o comportamento dos controladores, aplicou-se um afundamento total de tensão a partir de um curto-circuito trifásico equilibrado com duração de dois segundos no ponto de conexão comum (PCC) para simular um aumento repentino de carga. Conforme mencionado na Sessão 3.1, se abaixo de 59,95 Hz ou acima de 60,05 Hz os controladores atuam para prover inércia sintética à medida que aumentam ou diminuem a injeção de potência durante a perturbação.

Durante a aplicação do curto, conforme apresentado na Figura 6, é possível analisar o comportamento de cada

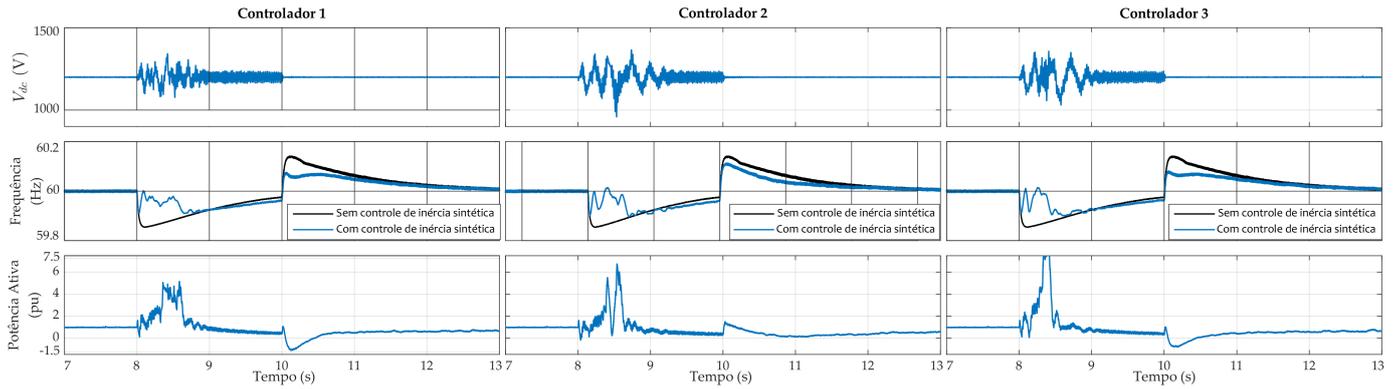


Figura 6. Tensão do barramento CC (V_{dc}), frequências com e sem inércia sintética e potência ativa.

um dos três controladores propostos. Quando comparados com o comportamento do sistema sem o controle de inércia sintética, percebe-se que houve uma melhora significativa na frequência *nadir*, na recuperação da frequência após cessar o distúrbio e até no tempo de retorno do sistema.

No que diz respeito à tensão do barramento CC, percebe-se que os três controladores mantiveram a tensão dentro dos limites operacionais desejados e este comportamento é essencial para manter a estabilidade e operação correta da máquina. Ao fim do curto, o nível de tensão manteve o comportamento de antes do curto, que é o esperado.

Em termos qualitativos, para a operação do barramento CC, é desejável que haja o mínimo de variação em torno da tensão de operação nominal, deste modo, percebe-se que o Controlador 2 obteve uma maior variação, principalmente de valores mínimos, seguido do Controlador 3, que obteve variações maiores que o Controlador 1. Deste modo, dentre os três controladores analisados, para este quesito, o Controlador 1 foi o que obteve um melhor comportamento.

Quando analisada a potência ativa, também é desejável que haja uma variação menos abrupta no comportamento deste sinal, tanto para que a estratégia de controle utilize de forma moderada os recursos inerciais das massas rotóricas e cause menos estresse à máquina, quanto para a própria preservação do sinal de controle em si.

Em relação à resposta em potência ativa, percebe-se que no Controlador 3 houve uma grande variação seguida de saturação, o que leva o comportamento do sistema a limites operacionais que não são desejados. O Controlador 2 também apresentou o comportamento de bastante variação quando comparado com o Controlador 1, que foi, mais uma vez, dentre os três controladores analisados, o que obteve um melhor comportamento.

Conforme visto na Figura 7, durante os dois segundos que o curto durou, o Controlador 1 não ultrapassou em momento algum a frequência nominal do sistema (60 Hz). Já os Controladores 2 e 3 não tiveram a mesma qualidade, o que pode ser explicado devido à agressividade na injeção de potência ativa dos mesmos, conforme já comentado.

No que diz respeito à frequência *nadir*, o Controlador 1 e o Controlador 3 obtiveram o mesmo desempenho, com $f_{nadir} = 59,9109 \text{ Hz}$ em $t = 8,0299 \text{ s}$, já o Controlador 2 obteve uma frequência *nadir* pior em relação ao Controlador 1 e 3: $f_{nadir} = 59,9019 \text{ Hz}$, além de ter sido um pouco mais lento ($t = 8,0334 \text{ s}$).

Outra análise que se faz importante é também considerar a recuperação da resposta do sistema após o término do curto. A partir deste critério, o Controlador 1 mais uma vez apresentou o melhor resultado pois alcançou logo após o término do curto, o menor pico de frequência: $f = 60,0759 \text{ Hz}$, no menor tempo de resposta: $10,0565 \text{ s}$ quando comparado as outras as Estratégias 2 e 3, que tiveram, respectivamente, os picos de $f = 60,1134 \text{ Hz}$ em $10,1132 \text{ s}$ e $f = 60,0813 \text{ Hz}$ em $10,0669 \text{ s}$, conforme verificado na Figura 7.

Em todas as três estratégias, pode-se perceber que há um limite operacional para o suporte de frequência. Após a resposta inicial ter sido eficaz na redução da frequência *nadir*, a partir de um determinado momento, o comportamento do aerogerador fica ligeiramente pior quando comparado com sistema sem inércia sintética. Este comportamento não é de veras preocupante pois o objetivo está em prover suporte inercial, contudo, a situação ideal seria melhorar as condições de operação para todo o período do distúrbio.

Como critério de desempenho analítico calculou-se a Integral do Erro Absoluto (IAE) do aerogerador com inércia sintética utilizando a frequência nominal como referência, de modo que os resultados estão na Tabela 3.

Tabela 3. Integral do Erro Absoluto (IAE).

Tempo	Sem Controle	Controlador 1	Controlador 2	Controlador 3
0 a 15s	0.7287 Hz	0.6344 Hz	0.6417 Hz	0.6427 Hz
8 a 15s	0.3176 Hz	0.2233 Hz	0.2307 Hz	0.2316 Hz

A primeira linha da Tabela 3 considera todo o tempo de simulação, inclusive os segundos iniciais que são consideráveis para a energização da máquina. Já a segunda linha calcula somente o período de interesse que é após aplicação do curto-circuito, ou seja, com $8 \text{ s} \leq t \leq 15 \text{ s}$.

Desta forma pode-se perceber que os Controladores 1, 2 e 3 proveram a inércia sintética e diminuíram o erro, respectivamente, em 29,69%, 27,36% e 27,08%, e, portanto, tem-se que o Controlador 1, obteve a menor IAE, menores magnitudes na oscilação do barramento CC, além de um menor esforço do sinal de controle: verificado pela injeção suave em curva e magnitudes da potência ativa em comparação com as outras estratégias (Figura 6).

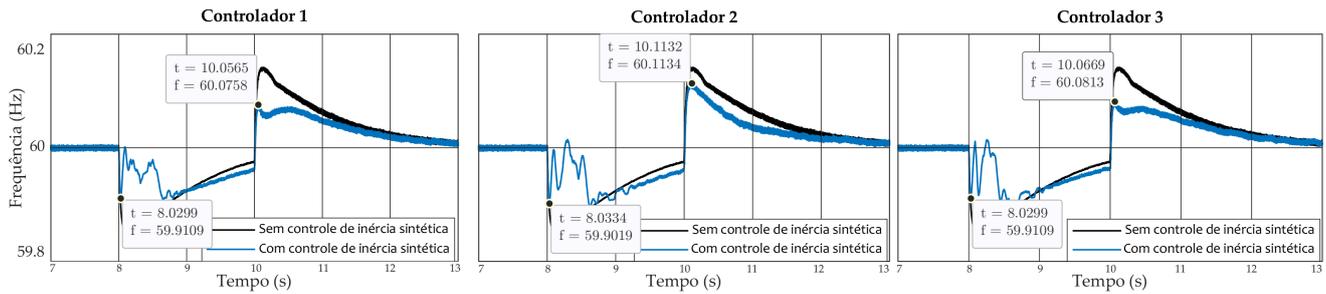


Figura 7. Destaques para a frequência nadir, frequência após o término do curto e o tempo de retorno para a frequência nominal.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho estudou-se estratégias de controle para implementação de inércia sintética em um aerogerador DFIG e propôs-se um método heurístico para sintonia dos controladores através de um algoritmo de busca por força bruta em camadas. Apesar do gasto computacional, garante-se a sintonia pela minimização da função objetivo obtida da simulação dinâmica executada no sistema completo e, desta forma, obteve-se resultados promissores: melhora significativa na frequência *nadir*, na resposta inercial primária e na recuperação do sistema após o término do distúrbio.

Para o limite operacional do suporte de frequência percebido nas três estratégias, quando a resposta fica levemente pior quando comparado com sistema sem inércia sintética, uma possível melhoria e trabalho futuro é adicionar um elemento armazenador de energia, tal como uma bateria ou supercapacitor, para injetar mais potência ativa para quando a estratégia apresentada culminar e assim melhorar as condições de operação para todo o período do distúrbio.

Para outros possíveis trabalhos futuros, pode ser proveitoso explorar o conceito da fronteira de Pareto com finalidade de explorar as regiões de mínimos locais com intuito de avaliar conceitos de estabilidade e robustez destas. Assim como implementar algoritmos de busca mais eficazes sob a perspectiva computacional e de conhecimento do comportamento do sistema frente à qualidade das regiões dos mínimos locais encontrados.

REFERÊNCIAS

- Aguilar, M.E.B. (2016). Sintonia de controladores para aerogeradores de velocidade variável com geradores de indução de dupla alimentação utilizando algoritmo metaheurístico de inteligência coletiva. 167.
- Barrios Aguilar, M.E., Coury, D.V., Reginatto, R., and Monaro, R.M. (2020). Multi-objective PSO applied to PI control of DFIG wind turbine under electrical fault conditions. *Electric Power Systems Research*, 180. doi:10.1016/j.epsr.2019.106081.
- Bonfiglio, A., Invernizzi, M., Labella, A., and Procopio, R. (2019). Design and implementation of a variable synthetic inertia controller for wind turbine generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(1), 754–764. doi:10.1109/TPWRS.2018.2865958.
- Cortajarena, J.A., Barambones, O., Alkorta, P., and Cortajarena, J. (2021). Grid frequency and amplitude control using dfig wind turbines in a smart grid. *Mathematics*, 9(2), 143.
- Dharmawardena, H., Uhlen, K., and Gjerde, S.S. (2016). Modelling wind farm with synthetic inertia for power system dynamic studies. In *Proc. IEEE Int. Energy Conf. (ENERGYCON)*, 1–6. doi:10.1109/ENERGYCON.2016.7514098.
- Dubé, L. (1996). Users Guide to Models in ATP.
- Freitas, P.V.P. (2017). *Um Algoritmo de Busca por Vértices com Características Específicas em Redes*. Ph.D. thesis, UFRJ. URL <https://www.cos.ufrj.br/uploadfile/publicacao/2798.pdf>.
- Gao, Q. and Preece, R. (2017). Improving frequency stability in low inertia power systems using synthetic inertia from wind turbines. In *Proc. IEEE Manchester PowerTech*, 1–6. doi:10.1109/PTC.2017.7980836.
- Gaspar Cunha, A., Takahashi, R., and Henggeler Antunes, C. (2012). Manual de computação evolutiva e metaheurística. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. doi:10.14195/978-989-26-0583-8.
- Ochoa, D. and Martinez, S. (2017). Fast-Frequency Response Provided by DFIG-Wind Turbines and its Impact on the Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 4002–4011. doi:10.1109/TPWRS.2016.2636374.
- P. Rosa, B., M. L. Assis, T., and A. Mourinho, F. (2021). Determinação da Inércia Mínima em Sistemas com Alta Penetração de Geração Eólica. doi:10.48011/sbse.v1i1.2408.
- Souza, P.A., R. dos Santos, R., C. N. Filho, M., Barbosa, D., and Sales Barros, L. (2020). Robustness Comparison of Synthetic Inertia Strategies for Doubly Fed Induction Generators under Different Operating Conditions. doi:10.48011/sbse.v1i1.2144.
- Souza, P.A. (2003). Análise de curto-circuito com a Inserção de Parques Eólicos no Sistema Elétrico.
- Souza, P.A., das Neves Filho, M.C., Barbosa, D., da Silva, K.F., and Barros, L.S. (2019). Modelagem e Utilização de Inércia Sintética em Aerogeradores Duplamente Alimentados no Software ATP. *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE2019)*.
- Xi, X., Geng, H., and Yang, G. (2016). Two-level damping control for DFIG-based wind farm providing synthetic inertial service. *IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016*. doi:10.1109/IAS.2016.7731844.
- Yang, P., Dong, X., Li, Y., Kuang, L., Zhang, J., He, B., and Wang, Y. (2019). Research on Primary Frequency Regulation Control Strategy of Wind-thermal Power Coordination. *IEEE Access*, 7, 144766–144776. doi:10.1109/ACCESS.2019.2946192.