Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Controle de Carga-Frequência em Plantas Térmicas com Turbinas a Gás Aplicando Controle Fracionário

Adauto Hanaoka * **Florindo A. de C. Ayres Junior** *
Renan L. P. de Medeiros * **Claudia Sabrina M. da Silva** *
Vicente F. de Lucena Junior **

* *Departamento de Eletricidade, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, Brasil. (adauto.hanaoka@hotmail.com, florindoayres@ufam.edu.br, renanlandau@ufam.edu.br, sabrinacsms@ufam.edu.br)*
** *Departamento de Eletrônica e Computação, FT/UFAM, Manaus - AM, Brasil. (vicente@ufam.edu.br)*

Abstract: This work investigates fractional-order control techniques applied to the speed, load, and frequency management of a high-capacity industrial gas turbine (heavy-duty). The aim is to optimize the turbine's response to fluctuations in load and generation, as well as to analyze fuel consumption. Two fractional approaches are employed to develop speed governor: one based on fractional-order pole placement, using the Oustaloup technique for its approximation, and another based on phase compensation with lead-lag, in conjunction with a classical lead-lag compensation method. The controllers' performance is evaluated through simulated tests implemented in the MATLAB/Simulink computational environment. These tests consider variations in the reference signal, the turbine's behavior in the event of an electrical fault, and the introduction of a noisy signal. The results indicate that the fractional-order controller pole placement performs best among the controlled systems.

Resumo: Neste trabalho, são investigadas técnicas de controle de ordem fracionária aplicadas ao gerenciamento de velocidade, carga e frequência de uma turbina a gás industrial de alta capacidade (*heavy-duty*). O objetivo é otimizar a resposta da turbina diante de flutuações na carga e na geração, além de analisar o consumo de combustível. Duas abordagens fracionárias são empregadas para desenvolver os reguladores de velocidade: um baseado na alocação de polos de ordem fracionária, utilizando a técnica de *Oustaloup* para sua aproximação, e outra fundamentada na compensação de fase com avanço e atraso (*lead-lag*), em conjunto com um método clássico de compensação *lead-lag*. A avaliação do desempenho dos controladores é realizada através de testes simulados implementados no ambiente computacional MATLAB/Simulink. Esses testes consideram variações no sinal de referência, o comportamento da turbina diante de uma falha elétrica e ao inserirmos um sinal ruidoso. Os resultados indicam que o controlador fracionário via alocação de polos possui o melhor desempenho entre os sistemas controlados.

Keywords: Automatic Control; Fractional-order compensator; Gas Turbine; Speed Governor; Load Control.

Palavras-chaves: Controle Automático; Compensador ordem fracionária; Turbinas a Gás; Regulador de Velocidade; Controle de Carga.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento contínuo da demanda por energia elétrica no país, a integração de unidades termoelétricas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem sido uma medida adotada para atender a essa demanda de forma mais eficaz. Como resultado, uma variedade de dispositivos é incorporada ao sistema, exigindo uma análise cuidadosa para avaliar sua contribuição ao sistema diante de distúrbios elétricos, variações de carga e frequência, sendo essencial para garantir a confiabilidade, qualidade e eficiência do sistema (SILVA, 2022). Esses sistemas inseridos devem operar dentro das condições de projeto, mantendo estabilidade e alta disponibilidade (operação contínua). Portanto, é crucial aprimorar os processos de produção de energia elétrica e modernizar os dispositivos existentes que compõem o SEP (AYRES JUNIOR et al., 2018).

Dentre os fenômenos analisados na área de Sistemas Elétricos de Potência, um dos focos de pesquisa extensivamente explorados está relacionado ao amortecimento de oscilações eletromecânicas (SILVA, 2022) e a resposta da Turbina a Gás (TG), diante do aumento de carga devido à

saída das unidades geradoras conectadas ao barramento infinito. Essas oscilações e o atraso na resposta diante dessas perturbações na rede podem resultar na restrição da capacidade de geração demandada pelo sistema da unidade geradora, contribuindo para uma diminuição na vida útil das máquinas do sistema. Além disso, esses fenômenos podem provocar uma considerável redução na margem de estabilidade do sistema de potência (KUNDUR, 1994; NOGUEIRA et al., 2014).

Com o propósito de enfrentar esse desafio, várias pesquisas tem sido conduzidas visando reduzir a instabilidade nos sistemas de geração de energia e buscando tambem otimizar consumo de combustível. Assim como foi realizado em NASIRI et al. (2021), onde investigou-se cerca do problema da regulação prática de potência em turbinas a gás, considerando simultaneamente restrições de atuadores, perturbações desconhecidas e ruídos de medição. Empregando-se uma abordagem baseada em controlador preditivo de modelo, complementada por um procedimento de filtragem e antifiltração de duas camadas para lidar eficientemente com os ruídos de medição. Além disso, para efetuar a validação dos controladores, utilizou-se o modelo de *Rowen*, ROWEN (1983), obtendo-se assim o modelo ideal para a turbina a gás.

Em SILVA et al. (2024) é apresentado uma aplicação prática de técnicas de controle automático para aprimorar o desempenho dos reguladores de velocidade em turbinas hidráulicas. Utilizando um modelo dinâmico de um sistema de energia em pequena escala de 2kVA, desenvolve-se um controlador PID de ordem fracionária (FOPID), além disso, um controlador PID clássico é sintonizado para comparar o desempenho dos dois controladores. O estudo avalia a eficácia da metodologia proposta por meio de simulações computacionais e testes experimentais, considerando variações na referência e carga e, os resultados demonstram a superioridade da metodologia fracionária proposta em relação a outras abordagens, destacando sua eficácia e flexibilidade.

Já em NANGRANI (2019), foi desenvolvido um controlador de ordem fracionária, similar a um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), com o objetivo de estabilizar o sistema de potência. Além disso, foram projetados outros dois estabilizadores: um seguindo o método convencional com compensador $lead - lag$ e outro baseado na lógica *Fuzzy*. Através de simulações computacionais, foi observado que o controlador de ordem fracionária apresentou um desempenho superior em comparação aos outros dois estabilizadores (NANGRANI, 2019).

Segundo FAIEGHI and NEMATI (2011), a teoria do cálculo de ordem fracionária explora a relação entre termos integrais e derivativos de ordens não inteiras. Assim, os controladores fracionários têm recebido cada vez mais atenção devido à sua flexibilidade e eficácia, possibilitando uma maior liberdade no ajuste das propriedades de ganho e fase desses controladores (AYRES JUNIOR et al., 2018).

Considerando o contexto atual da pesquisa, este trabalho tem como objetivo desenvolver um regulador de velocidade (RV) usando um método que emprega um compensador *Lead-Lag* de ordem fracionária, que ao ser aplicado ao sistema de controle da turbina a gás, proporciona uma resposta mais rápida a degraus de carga, resultando em uma rápida adaptação da turbina a gás às variações de frequência da rede. Reduzindo o sobressinal e o tempo de estabilização, o que, a médio e longo prazo, contribui para preservar o sistema contra condições de estresse térmico e reduzir o consumo excessivo de combustível durante transientes, alcançando uma maior estabilidade do sistema de potência e aumentar a vida útil da turbina a gás, que está sujeita a esforços mecânicos decorrentes desses distúrbios. Além disso, busca-se:

- Desenvolver do modelo matemático da Turbina a gás e seus componentes;
- Sintonizar um regulador de velocidade utilizando um compensador $lead - lag$ convencional (SAUER and PAI, 2018);
- Projetar um compensador $lead - lag$ aplicando a metodologia de alocação de polos de ordem fracionária (AYRES JUNIOR et al., 2020) e a aproximação de *Oustaloup*;
- Desenvolver um compensador de ordem fracionário utilizando o método desenvolvido por AYRES JUNIOR et al. (2018) e a aproximação de *Charef* CHAREF et al. (1992);
- Examinar e comparar o desempenho dinâmico ao aplicar os compensadores fracionários em relação ao método clássico.

A avaliação do desempenho dos reguladores foi conduzida por meio de testes realizados em um ambiente computacional utilizando a ferramenta *MATLAB/Simulink*. Esses testes simularam variações de carga no sistema de controle, o qual emprega uma turbina a gás.

O modelo da turbina a gás foi derivado do estudo clássico conduzido por ROWEN (1983), enquanto os modelos do gerador e da linha de transmissão foram baseados em modelos clássicos de máquina síncrona e linha de transmissão. Vale ressaltar que os valores dos parâmetros utilizados foram obtidos a partir de procedimentos sugeridos por TAVAKOLI et al. (2009), os quais extraem os valores das próprias condições de operação.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A turbina a gás é uma máquina rotativa que opera utilizando a energia dos gases de combustão (JABARI et al., 2020). E, a obtenção de um modelo eficaz para uma turbina a gás e a precisão na determinação de seus diversos parâmetros emergem como fatores cruciais na promoção da estabilidade do sistema de energia (KIM et al., 2018).

Além disso, o sistema de controle é essencial para funcionamento correto de uma usina de turbina a gás, pois, sem um esquema de controle adequado, qualquer variação na demanda de energia ou desvio de frequência pode levar ao superaquecimento, excesso de velocidade, ou ao desligamento do sistema (NASIRI et al., 2021).

Sendo assim, nessa seção é apresentado o modelo matemático de uma turbina a gás e os sistemas de controle que a compõem.

2.1 Modelagem da Turbina a Gás

Em termoelétricas, as configurações de ciclo podem ser abertas, com a turbina a gás operando de forma que os

gases de exaustão são liberados para a atmosfera (não havendo aproveitamento deste residual energético), ou fechada, onde estes gases de exaustão são recuperados em uma caldeira de recuperação de calor que produz vapor de água que é consumido por uma turbina a vapor, convertendo a energia residual da turbina a gás e melhorando a eficiência do ciclo. O modelo considerado neste trabalho, aplicando as devidas adaptações relativas à planta, é baseada na representação proposta por ROWEN (1983).

Na Figura 1 é apresentado o esquemático de uma turbina a gás com configuração de ciclo em aberto, o qual é composto por um compressor, uma câmara de combustão e a turbina de potência para converter a energia do gás inflamado e em alta pressão em potência mecânica (GIOSTRI et al., 2020).

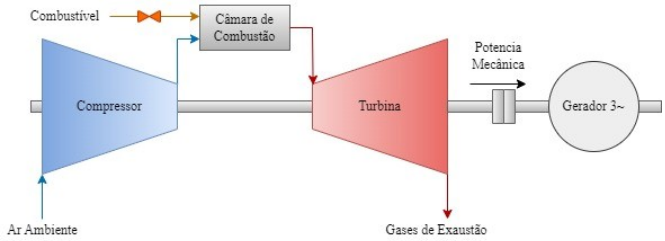

Figura 1. Esquemático de turbina a gás em ciclo simples. Fonte: Adaptado de Passaro (2002).

Para o desenvolvimento do modelo da turbina a gás, realizou-se uma aproximação a um sistema de primeira ordem, sendo a reposta a velocidade do rotor em função de uma variação direta do fluxo de combustível, considerando-se um atraso (*delay*) (PASSARO, 2002). Desta maneira, o modelo de uma turbina a gás considera o controle de velocidade, controle de aceleração do conjunto rotor, controle de temperatura de gases de exaustão, combustor, válvulas e atuadores de gás o qual compõe o conjunto.

Assim como investigado por ROWEN (1983), efetuou-se o ajuste dos modelos para a aplicação dos reguladores de velocidade, no âmbito da análise temporal. E, posteriormente, a dinâmica das turbinas têm sido objeto de estudo sob essa mesma abordagem temporal, onde são empregadas as equações de conservação, conforme descrito por SCHOBEIRI (2005).

As turbinas e os reguladores de velocidade desempenham um papel fundamental na avaliação da estabilidade angular de um sistema elétrico de potência, pois têm influência direta no torque mecânico (T_m) disponível no eixo do gerador, especialmente no que se refere à sua aceleração ($\ddot{\delta}$). Esse controle impacta diretamente na variação da potência ativa gerada e no deslocamento angular dos rotores (δ).

Agrupando ambas as condições de regulação de velocidade, em isócrono e em estatismo, pode-se representá-la através da função de transferência de um regulador de velocidade, apresentada na equação (1), onde a modalidade isócrona ou com estatismo (*droop*) depende dos valores adotados para os parâmetros W, X ,Y, Z.

$$\frac{\omega_s(s)}{\omega(s)} = \frac{W(1+Xs)}{(Z+Ys)} \tag{1}$$

onde: $\omega_s(s)$ é o sinal de saída do regulador de velocidade em p.u. e, $\omega(s)$ é a velocidade angular no eixo do rotor.

Portanto, quando $X = 0$ e $Z = 0$, têm-se a operação puramente isócrona (controle integral). Para a operação proporcional-integral (PI), $Z = 1$. E para a operação com queda de velocidade ou estacionária, caracterizada por erro em regime permanente, tem-se $X = 1$.

Para evitar a ocorrência de regiões de surto, caracterizadas pela instabilidade operacional, é essencial controlar e limitar a aceleração do conjunto. A turbina a gás tem seu desempenho influenciado pela variação da massa de ar admitida no compressor e pela temperatura dos gases de combustão. Parâmetros como a descarga do compressor e a temperatura de exaustão da turbina são críticos nesse contexto. A densidade do ar, afetada pela temperatura ambiente, influência diretamente o rendimento da turbina e o poder energético dos gases pós-combustão. Portanto, é crucial manter a turbina em condições operacionais seguras, evitando tanto temperaturas extremas que possam danificar o equipamento quanto perdas de potência decorrentes de pequenas variações de temperatura.

Na Figura 2, é apresentado o diagrama em blocos que representa o modelo matemático de um sistema com turbina a gás.

Na malha de medição de temperatura, é importante considerar o atraso de transporte causado pelo próprio sensor e pela proteção térmica associada. Para as três malhas de controle — velocidade, temperatura e aceleração — é realizada uma comparação entre os valores medidos, selecionando-se o menor deles. Esse valor mínimo determina a demanda mínima de combustível necessária. O seletor de mínimo realiza essa comparação de forma imediata, sem introduzir atrasos no sistema. Para o uso de combustível líquido, é essencial sua atomização com ar, o que resulta em uma queima mais eficiente do combustível e na redução de perdas, melhorando assim a retroalimentação da malha de controle.

Todo esse processo, somado à compressão do combustível e à inércia do sistema entre o medidor de vazão do combustível e a válvula de controle, provoca um atraso na medição. Esse atraso afeta o desempenho do combustor, que é composto pela câmara de combustão e pela válvula com posicionador.

A turbina a gás pode ser representada pela função de transferência descreve-se o posicionador da válvula (G_1), sistema de combustível (G_2) com retroalimentação do combustor K_f. Considerando a simplificação da função de transferência da turbina a gás, e levando em conta o atraso do combustor e a dinâmica de descarga do combustor representados por H_2, a equação pode ser expressa conforme a equação (2)

$$G_{gt} = K_c H_1 H_2 \tau^{-T_d.s} \tag{2}$$

Sendo:

$$H_1 = \frac{G_1 G_2}{1 + K_f G_1 G_2} \tag{3}$$

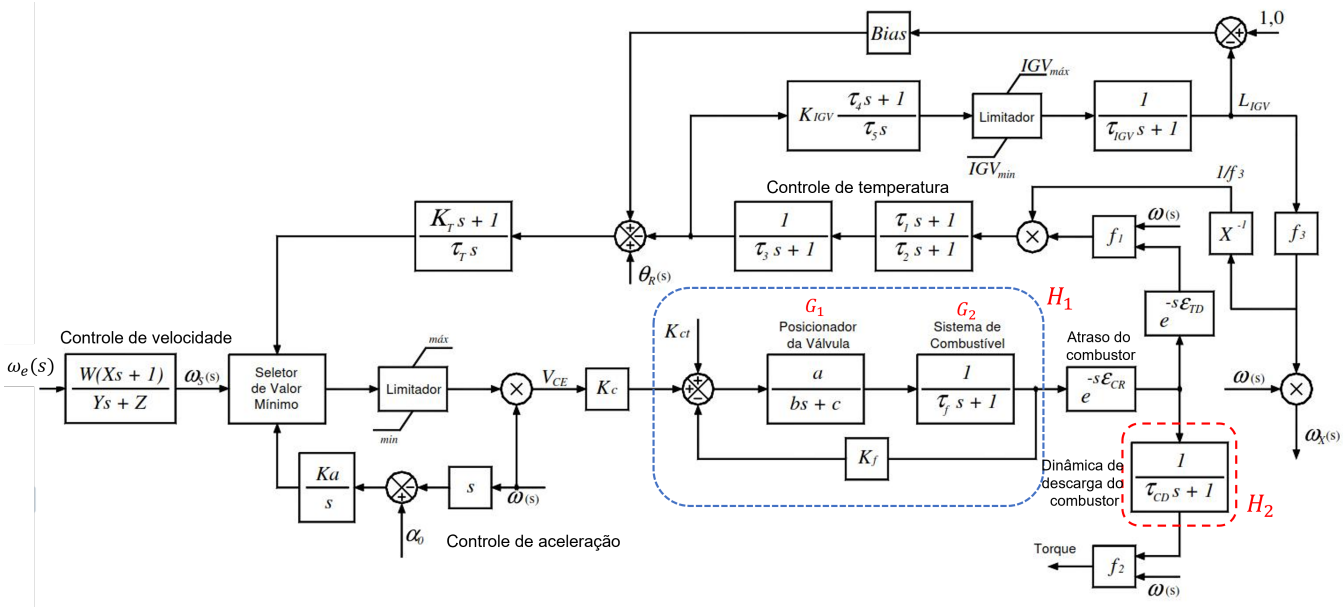

Figura 2. Diagrama em blocos do sistema com turbina a gás simulado.

3. SINTONIA DOS CONTROLADORES

Para realizar o projeto dos reguladores de velocidade utilizou-se o modelo simplificado da turbina a gás apresentado na equação (2) e, para a efetuar as simulações e teste usa-se o modelo da turbina a gás representado na Figura 2. Os parâmetros operacionais utilizados nas simulações da turbina de um eixo tipo *heavy-duty* estão presentes na tabela 1.

Portanto, nessa seção são apresentadas as metodologias utilizadas na sintonia dos reguladores de velocidade clássico e de ordem fracionária

3.1 Sintonia do RV Clássico

Para a sintonia do regulador de velocidade, utiliza-se o esquemático de sistema em malha fechada da planta, referenciado na equação (4).

$$\frac{P_m}{\omega_e(s)} = (K_1 H_1 H_2 \tau^{-T_d.s}).\left(\frac{W(1+Xs)}{(Z+Ys)}\right) \tag{4}$$

Para o projeto do regulador de velocidade clássico, utiliza-se a representação de compensação $lead-lag$ no domínio da frequência desenvolvida em SAUER and PAI (2018), conforme a equação (5).

$$C_{clas}(s) = k\left(\frac{\tau_1 s+1}{\tau_2 s+1}\right) \tag{5}$$

O controlador *lead-lag* denota em sua forma de representação canônica os valores das constantes de tempo τ_1 e τ_2. Logo, inicialmente, realiza-se a escolha da constante τ_1 como um valor entre 0,1 a 1,5, posteriormente, valor da constante τ_2 pode ser calculada a partir da equação (6).

$$\tau_2 = \frac{1}{\tau_1 \cdot \omega_{cg}^2} \tag{6}$$

Tabela 1. Parâmetros do Sistema

Sistema de Combustível					
Parâmetro	**Valor**				
Gasoso	a	B(s)	c	tf(s)	k_f
	1	0,20	1	0,1	0
Líquido	a	B(s)	c	tf(s)	k_f
	1	0,05	1	0,4	0,1
Parâmetro					**Valor**
Sem consumo de combustível				Wmin	0,1
Limite máximo				(p.u.)	1,5
Limite mínimo				(p.u.)	-0,13
Malha de Temperatura					
Parâmetro					**Valor**
Protetor contra radiação				τ_1	12
				τ_2	15
Termopar				τ_3 (s)	2,5
Controle de Temperatura				K_τ	3,3
				τ_3 (s)	250
Outros Elementos					
Parâmetro					**Valor**
Combustor	Gasoso			ε_{CR} (s)	0
	Líquido				0,01
Sistema de Exaustão	Gasoso			ε_{TD} (s)	0
	Líquido				0,04
Descarga do Compressor	Gasoso			τ_{CD} (s)	0
	Líquido				0,02
Rotor				τ_t	15,64
Regulador de Tensão					
Parâmetro					**Valor**
Filtro Passa-baixa				T_r (s)	0,02
Ganho do Regulador				K_a	50
				T_e (s)	0,001
Limite de Regulação Tensão de Campo				E_{fmin} (p.u.)	0
				E_{fmax} (p.u.)	4
Máquina Síncrona					
Parâmetro					**Valor**
Potência de Saída				T_0 (p.u.)	1
Potência Nominal do Gerador				S (VA)	66 M
Frequência				f (Hz)	60
Tensão				V (Vrms)	20 k
Coeficiente de Inércia				H	15,52

Desta forma, os valores dos parâmetros utilizados para a sintonia do controlador clássico são descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros regulador de velocidade pelo método clássico

Regulador de Velocidade Ganho	(W=1/droop, P.U. MW/P.U. velocidade)	20
Frequência de cruzamento de ganho	$\omega_n(rad/s)$	0,6
Constante de tempo 1	τ_1 (s)	0,2
Constante de tempo 2	τ_2 (s)	13,88
Z	Isócrono / Droop	0 /1

Obtendo-se assim o compensador $lead - lag$ apresentado na equação (7)

$$C_{clas}(s) = 20\left(\frac{0,2s+1}{13,88s+1}\right) \tag{7}$$

3.2 Sintonia do RV pelo Método de Alocação de Polos de Ordem Fracionária

Para o regulador de velocidade de ordem fracionária proposto, a estrutura do controlador pode ser representada pelo diagrama de blocos da Figura 3

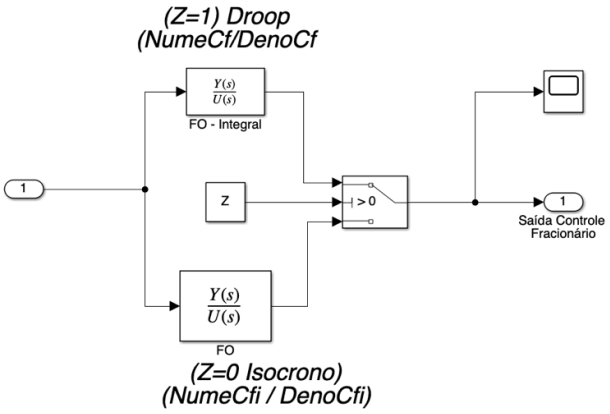

Figura 3. Representação diagrama de blocos governador de velocidade fracionário.

Em AYRES JUNIOR et al. (2020), é apresentada uma técnica de sintonia de controladores de ordem fracionária baseada em um método de alocação de polos de ordem fracionária (FOPP, do inglês *Fractional Order Pole Placement*). Esta metodologia consiste em determinar os coeficientes do controlador através de igualdades polinomiais entre o polinômio desejado, que contém as especificações de projeto almejadas, e o polinômio característico do sistema em malha fechada.

Para realizar a sintonia do RV FOPP, inicialmente, é preciso determinar os valores das especificações de projeto desejadas. Esses valores incluem a frequência natural (ω_n), calculada conforme a equação o coeficiente de amortecimento (E_d) e o expoente fracionário (α).

Posteriormente, realiza-se a aplicação da equação diofantina. Para isso, considera-se o sistema em malha fechada com o RV na malha direta, sendo o controlador fracionário Lead-Lag definido pela equação (8), com ($\alpha = 0,5$) (BANZANELLA and Silva Junior, 2017).

Tabela 3. Parâmetros regulador de velocidade pelo método FOPP com dinâmica em isócrono.

Regulador de Velocidade Ganho	(W=1/droop, P.U. MW/P.U. velocidade)	21.8
Frequência natural	$\omega_n(rad/s)$	2,91
Coef. Amortecimento	E_d	0,01
Distancia Polos	k_a	10

$$G(s) = \frac{c_{2,5}s^{2,5} + c_2s^2 + c_{1,5}s^{1,5} + c_1s + c_{0,5}s^{0,5} + c_0}{s^3 + d_{2,5}s^{2,5} + d_2s^2 + d_{1,5}s^{1,5} + d_1s + d_{0,5}s^{0,5} + d_0} \tag{8}$$

Deduzindo o controle fracionário para modo isócrono, aplicou-se um controlador fracionário integral. Considerando o diagrama de blocos do governador da Figura (3), para um controle em modo isócrono, o valor da retroalimentação deste controle é nulo, descrevendo-se portanto um controlador puramente integrativo.

Portanto, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 3 de FOPP e aplicando a aproximação de Oustaloup apresentado em VALÉRIO and Costa (2013), obtém-se a função de transferência para controle fracionário mostrado na equação (9).

$$C_{oust}(s) = \frac{4,825s^2 + 26,56s + 14,45}{s^2 + 15,57s + 23,95} \tag{9}$$

3.3 Sintonia do RV pelo Método Fracionário de Ayres Júnior

Em Ayres Junior et al. (2018) foi desenvolvida uma metodologia para projeto do compensador $lead - lag$ baseado no cálculo de ordem fracionária, conforme mostrado na equação (10)

$$C(s) = k\left(\frac{\tau_1+1}{\tau_2+1}\right)^{\alpha} \tag{10}$$

Portanto, utilizando a frequência do sistema $\omega_{cg} = 0,637$ e definindo $\tau_2 = 1$, calcula-se τ_1 por meio da equação (11).

$$\tau_1 = \frac{1}{\tau_2\omega_{cg}^2} \tag{11}$$

Resulta assim $\tau_1 = 2,46$ e definindo um ganho $k = 20$, sendo α determinado por:

$$\alpha = \frac{1}{\theta_{mf}}\left[\tan^{-1}(\omega_{cg}\tau_1) - \tan^{-1}(\omega_{cg}\tau_2)\right] \tag{12}$$

Portanto, para uma margem de fase de $\theta_{mf} = 4,59$(rad/s), obtém-se um coeficiente fracionário $\alpha = 0,321$. Sendo assim, obtém-se o compensador $lead - lag$ de ordem fracionária da equação (13).

$$C(s) = 20\left(\frac{2,46s+1}{s+1}\right)^{0,321} \tag{13}$$

Para realizar a aplicação do compensador $lead - lag$, necessitou-se realizar uma aproximação do controlador

(13) de ordem fracionária para uma função de transferência de ordem inteira. Para isso, utilizou-se o método desenvolvido e apresentado em CHAREF et al. (1992).

4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes conduzidos na renomada plataforma Matlab e Simulink, realizando uma comparação entre os controladores ajustados por meio dos métodos propostos.

Os resultados apresentados em azul, referem-se ao sistema com compensador $lead - lag$ clássico, os resultados em verde, representam o sistema com o compensador via alocação de polos de ordem fracionária e, os resultados plotados em vermelho, ilustram o sistema com compensador $lead - lag$ de ordem fracionária desenvolvido por Ayres Júnior.

4.1 Variação de Referência de Velocidade

O teste realizado no sistema em modo isócrono envolve a variação na referência de velocidade, onde uma velocidade adicional de +0,1 p.u. é inserida no momento t = 15 s.

Analisando a resposta da variável velocidade em relação à variação do sinal de referência, apresentado na Figura 4, observa-se que em $t = 15$ s, todos os sistemas controlados apresentam uma oscilação máxima de velocidade semelhante de 1,001 p.u. Posteriormente, o controlador $lead{-}lag$ fracionário exibe uma resposta que apresenta distorções em fase parecidas com as do controlador clássico, demonstrando uma tendência de resposta de acomodação similar em aproximadamente 8 segundos.

Já o sistema com compensador via FOPP com a aproximação de Charef exibe distorções ligeiramente menores em amplitude, totalizando 0,8 p.u., em comparação com os outros dois controladores mencionados. Além disso, ele demonstra uma tendência de tempo de acomodação mais curta, alcançando 4 segundos, o que é 2 segundos mais rápido do que o controle clássico.

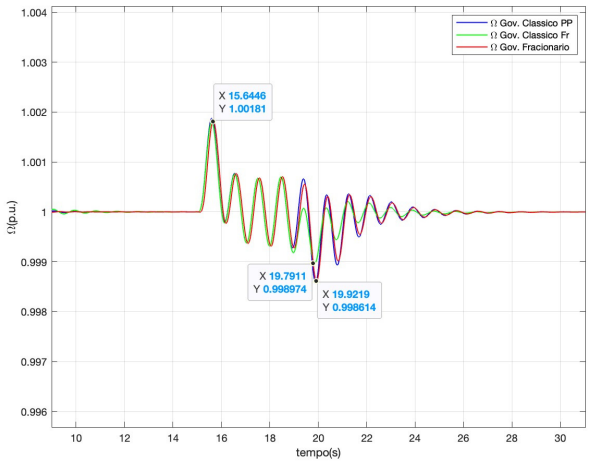

Figura 4. Resposta da variável velocidade em relação à variação do sinal de referência de velocidade

Com relação à resposta do sinal de potência ativa à variação na referência de velocidade, a Figura 5 revela que os três controladores examinados exibem um perfil de comportamento inicial semelhante, com sobressinal comparável de 1,5 p.u. No entanto, o compensador via FOPP com a aproximação de Charef demonstrou uma rápida tendência de acomodação em comparação aos outros controladores, atingindo o tempo de acomodação em apenas 4 segundos, o que representa uma melhora de 3 segundos em relação ao controle clássico. Sendo que, o sinal de potência resultante da resposta do controlador fracionário mostrou uma diminuição leve na amplitude, totalizando 1,3 p.u., e exibiu uma pequena defasagem em relação ao controlador clássico.

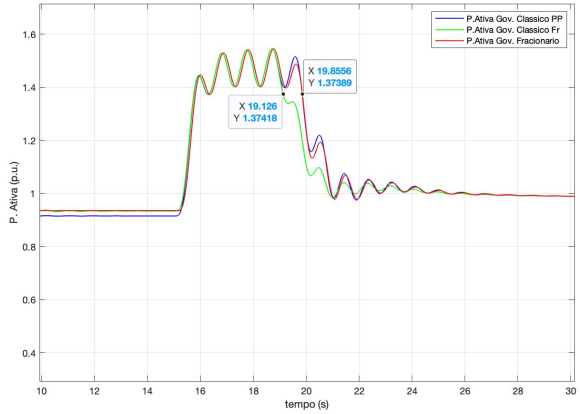

Figura 5. Resposta da variável potência ativa em relação à variação do sinal de referência de velocidade

Ao analisar o comportamento da potência reativa, conforme mostrado na Figura 6, observou-se um sub-sinal de -0,13 p.u., no qual os controladores fracionários demonstraram uma performance superior em termos de rapidez de resposta (4 segundos) e tendência de acomodação rápida em comparação com o controlador clássico. É importante notar que o controle de tensão empregado neste experimento não possui um componente fracionário associado, resultando na resposta da potência reativa como uma reação à variação da potência ativa.

Ao combinar a análise das potências ativa e reativa, o gráfico da Figura 7 ilustra o comportamento do ângulo de carga em resposta à variação da referência de velocidade. Notavelmente, os dois controladores fracionários exibiram uma resposta mais rápida em comparação com o controlador clássico. Especificamente, o controlador fracionário ajustado por meio de FOPP demonstrou uma atenuação mais rápida e com uma amplitude menor, alcançando a estabilidade em apenas 2 segundos.

4.2 Falta Elétrica

Com o intuito de avaliar a robustez e a resposta do controlador, foi aplicada uma falta elétrica neste modelo, sendo caracterizada por um curto-circuito Fase-Terra na saída do gerador síncrono.

Após a estabilização do sistema em t=15 s, foi aplicada uma falta elétrica com duração de 100 ms. Nessa condição,

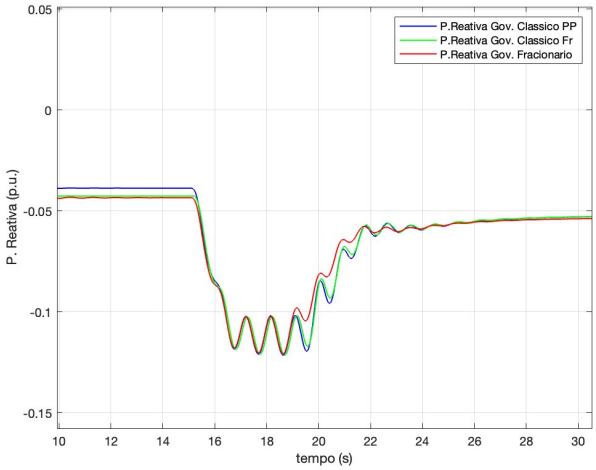

Figura 6. Resposta da variável potência reativa em relação à variação do sinal de referência de velocidade

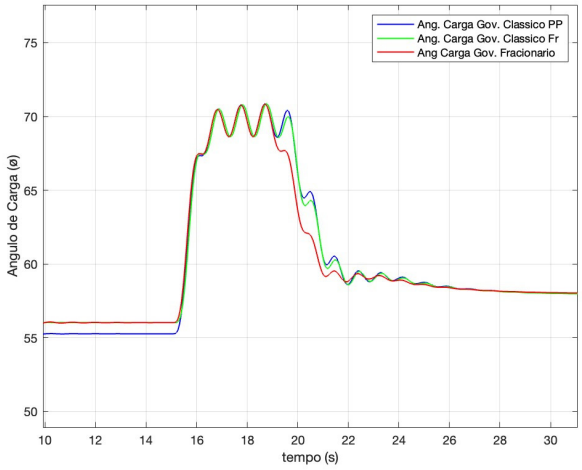

Figura 7. Resposta da variável ângulo de carga em relação à variação do sinal de referência de velocidade

observou-se um sub-sinal de 0,9985 p.u. nas três formas de controle. No entanto, o controlador fracionário apresentou uma resposta superior em comparação aos outros controladores, com um tempo de acomodação menor e um sobressinal atenuado, conforme mostrado na Figura 8, alcançando 1,02 p.u. Tanto o controlador clássico quanto o controlador via FOPP apresentaram a mesma resposta em termos de fase e frequência, porém, foi observado uma amplitude de sinal menor no sistema com controlador clássico.

4.3 Inserção de Sinal Ruidoso

Para avaliar os limites de estabilidade dos controladores, foi adicionado um ruído branco inicial de 5% e este sinal foi implementado nas mesmas condições de ensaio.

Conforme apresentado na Figura 9, o comportamento do sinal de velocidade para o controle fracionário demonstra uma variação de amplitude menor, registrando 1,0001 p.u., em comparação aos outros controladores. O sistema com regulador FOPP apresentou um comportamento muito

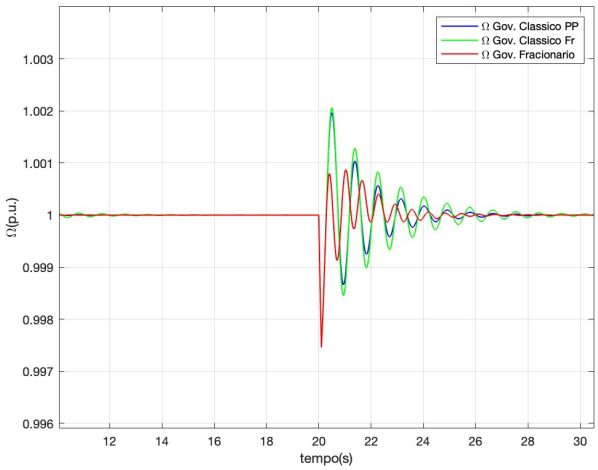

Figura 8. Comportamento da velocidade em falta fase-terra.

similar ao do controlador fracionário. Por outro lado, o controlador clássico exibiu grandes variações de amplitude, totalizando 1,003 p.u.

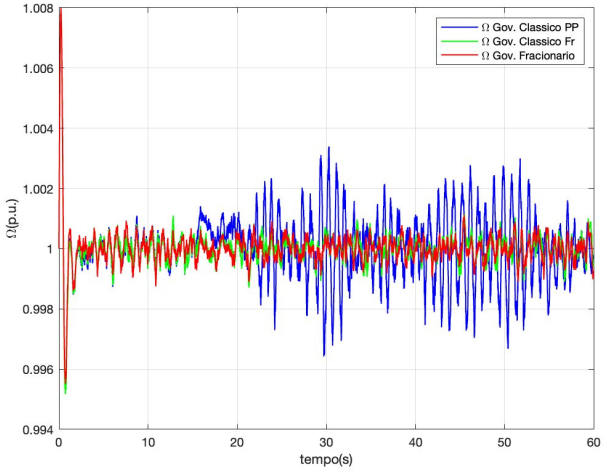

Figura 9. Comportamento velocidade com inserção de ruído branco

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo que visa melhorar o controle da frequência/potência, não apenas para garantir a estabilidade da geração, mas também para reduzir o tempo e a frequência de eventos nos quais a máquina é submetida a condições de estresse térmico e consumo excessivo de gás durante os regimes transitórios. Isso resulta em uma economia significativa a médio e longo prazo, ao aumentar os intervalos entre as manutenções e reduzir o consumo de gás.

O regulador de velocidade sintonizado pelo método de alocação de polos de ordem fracionária, demonstra uma resposta superior ao distúrbio, resultando em um sobressinal reduzido e um tempo de acomodação menor em comparação com o controlador clássico e o controlador fracionário

de Ayres Júnior. Este avanço tem o potencial de trazer benefícios significativos para o setor, contribuindo para a eficiência operacional e a economia de recursos.

Ao correlacionar o desempenho dinâmico superior obtido nos ensaios com o controlador FOPP, com os aspectos relacionados ao estresse térmico e ao consumo de combustível, é possível associar essa resposta rápida do controle com períodos transitórios curtos e rápida estabilização, visando evitar que a planta seja exposta a condições prolongadas de alta temperatura, que resultam do sobressinal da válvula de combustível. Isso não apenas otimiza o consumo de combustível, mas também contribui para minimizar o desgaste dos equipamentos internos da turbina, reduzindo a frequência de manutenções.

A análise da pertinência da troca de equipamentos internos da turbina é uma consideração importante durante as manutenções de turbinas a gás. Ao obter uma sintonia de controle fracionário que oferece uma resposta rápida ao distúrbio, baixo sobressinal e curto tempo de acomodação, é possível prolongar o intervalo entre intervenções e adiar de forma segura a necessidade de trocar componentes. Isso não apenas aumenta a eficiência operacional, mas também reduz os custos associados à manutenção e à substituição de peças (HANAOKA, 2024).

REFERÊNCIAS

AYRES JUNIOR, F.A.D.C., BESSA, I.V., PEREIRA, V.M.B., SILVA FARIAS, N. J.and MENEZES, A.R., MEDEIROS, R.L.P., and COSTA, C.T. (2020). Fractional order pole placement for a buck converter based on commensurable transfer function. *ISA Transactions*. doi:10.1016/j.isatra.2020.07.034.

AYRES JUNIOR, F., COSTA JUNIOR, C., MEDEIROS, R., BARRA JUNIOR, W., NEVES, C., LENZI, M., and VERONEZE, G. (2018). A fractional order power system stabilizer applied on a small-scale generation system. *Energies*, 11. doi:10.3390/en11082052.

BANZANELLA, A.S. and Silva Junior, J.M.G. (2017). *Sistema de Controle: Princípios de Controle*. UFGRS EDITORA, Porto Alegre.

CHAREF, A., Sun, H., Tsao, Y., and Onaral, B. (1992). Fractal system as represented by singularity function. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(9), 1465–1470. doi:10.1109/9.159595.

FAIEGHI, M.R. and NEMATI, A. (2011). *On Fractional-Order PID Design, Applications of MATLAB in Science and Engineering*. INTECH.

GIOSTRI, A., Binotti, M., Sterpos, C., and Lozza, G. (2020). Small scale solar tower coupled with micro gas turbine. *Renewable Energy*, 147, 570–583. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.013. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119313436`.

HANAOKA, A. (2024). Análise de desempenho dinamico de sistemas de controle de carga-frequência em plantas térmicas com turbinas a gás aplicando controle fracionário. 2024. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas (UFAM)*.

JABARI, F., Ghaebi, H., Mohammadi-Ivatloo, B., Mohammadpourfard, M., and Bannae-Sharifian, M.B. (2020). Design, worst case study, and sensitivity analysis of a net-zero energy building for sustainable urban development. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101991. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101991. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719335322`.

KIM, D.J., Moon, Y.H., Choi, B.S., Ryu, H.S., and Nam, H.K. (2018). Impact of a heavy-duty gas turbine operating under temperature control on system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4), 4543–4552. doi:10.1109/TPWRS.2017.2781239.

KUNDUR, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Professional Publishing, London.

NANGRANI, S.P. (2019). State of art fractional order controller for power system stabilizer. *ournal of Intelligent Fuzzy Systems*, 36, 2165–2173. doi:10.3233/jifs-169928.

NASIRI, A., Bayat, F., Mobayen, S., and Hosseinnia, S.H. (2021). Gas turbines power regulation subject to actuator constraints, disturbances and measurement noises. *IEEE Access*, 9, 40155–40164. doi:10.1109/ACCESS.2021.3064893.

NOGUEIRA, F., Barra, W., Costa, C., Moraes, A., Gomes, M.C.M., and Lana, J. (2014). Design and experimental evaluation tests of a takagi–sugeno power system stabilizer. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8, 451–462. doi:10.1049/iet-gtd.2013.0099.

PASSARO, M.C. (2002). Modelagem de turbinas a gás e sua aplicação em programas de simulação de transitórios eletromecânicos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá EFEI*.

ROWEN, W.I. (1983). Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines. *Journal of Engineering for Power*, 105(4), 865–869. doi:10.1115/1.3227494. URL `https://doi.org/10.1115/1.3227494`.

SAUER, P.W. and PAI, M.A. (2018). *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. Wiley-IEEE Press.

SCHOBEIRI, M. (2005). *Generic Modeling of Turbomachinery Components and Systems*, 305–318. doi:10.1007/978-3-540-26591-7_13.

SILVA, C.S.M.d. (2022). Implementação de estratégia de controle de ordem fracionária aplicadas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema de geração em escala reduzida. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas (UFAM)*.

SILVA, C.S.M.d., Silva, N.J.F.D., Ayres Júnior, F.A.D.C., De Medeiros, R.L.P., Silva, L.E.S.E., and De Lucena, V.F. (2024). Experimental implementation of hydraulic turbine dynamics and a fractional order speed governor controller on a small-scale power system. *IEEE Access*, 12, 40480–40495. doi:10.1109/ACCESS.2024.3375349.

TAVAKOLI, M.R., Vahidi, B., and Gawlik, W. (2009). An educational guide to extract the parameters of heavy duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1366–1374. doi:10.1109/TPWRS.2009.2021231.

VALÉRIO, D. and Costa, J.S. (2013). *Introduction to Fractional Control*. The Institution of Engineering and Technology - IET, London.