

# Otimização dos parâmetros de controle para operação de microturbinas a gás

Walquíria do N. Silva, Bruno Henriques Dias,  
Leonardo W. de Oliveira, Janaína G. Oliveira.

*Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 36036-330, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.*

*E-mail(s): walquiria.silva@engenharia.ufjf.br, bruno.dias@ufjf.edu.br, leonardo.willer@ufjf.edu.br, janaina.oliveira@ufjf.edu.br*

---

## Abstract:

Este artigo apresenta uma metodologia de sintonia dos parâmetros do controlador do tipo Proporcional Integral (PI) em malha fechada para o sistema de potência da microturbina a gás (MTG), visando aumentar a capacidade de resposta à demanda do sistema. Para tanto, é proposto um algoritmo de otimização, Sistema Imunológico Artificial (SIA), para identificar os parâmetros de sintonia adequados do regulador proposto. Além disso, desenvolveu-se um modelo simplificado de simulação a fim de reduzir o tempo de simulação. O modelo simplificado é validado através da comparação com as simulações do modelo completo MTG via software Simulink MATLAB®. O principal objetivo foi conceber um sistema adequado visando à otimização operacional da MTG na conversão de energia para aplicações de sistemas de cogeração e geração distribuída (GD). Os resultados derivados do algoritmo SIA no dispositivo de controle do MTG foram satisfatórios, através dos modelos de simulação simplificado e completo, validados por meio de simulação.

*Keywords:* Controle; Geração Distribuída; Microturbina a Gás; Otimização; Sistema Imunológico Artificial.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração distribuída (GD) são recursos de energia elétrica provenientes de fontes renováveis e incentivadas obtidas por meio de instalação de unidades geradoras de pequeno e médio porte, próximas aos pontos de consumo. E essas aplicações vêm sendo utilizadas objetivando o suprimento sustentável de modo eficiente, com menor custo e promovendo a incorporação de tecnologias alternativas ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), possibilitando a descentralização do sistema de geração (HA et al., 2017).

A busca por soluções energéticas como a utilização de GDs atreladas à redes inteligentes tem como intuito o desenvolvimento de modelos energéticos que propiciem: confiabilidade, estabilidade, qualidade e eficiência energética aos sistemas de geração e distribuição. Aplicações de GDs podem ser caracterizadas pelas instalações de sistemas fotovoltaicos (SFV), microturbinas a gás (MTG), eólicos, motores de combustão interna, células a combustível e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) (Moreira, 2018).

Dentre os diferentes recursos utilizados para geração de energia que também podem se enquadrar como GD, está a MTG, que consiste em uma fonte despachável. As MTGs geram um alto potencial calorífico, o que possibilita, além da oferta de energia elétrica, o uso para alimentação de cargas térmicas, caracterizando os sistemas de cogeração e aumentando a eficiência do conjunto em que estão inseridas (Nelson et al., 2018).

As MTGs são utilizadas em aplicações que requerem alta qualidade no fornecimento de energia, para locais de difícil acesso (geração isolada), e para supressão de picos de tensão. Podem ser conectadas à rede principal ou alimentar cargas locais, sendo utilizadas em aplicações de média e baixa tensão (Silva et al., 2019).

Visando à otimização de operação de sistemas de geração de energia utilizando MTG, estudos da viabilidade de aplicações e uso de microturbinas em sistemas isolados, conectadas à rede e em plantas de cogeração/trigeração têm sido realizados. Estes estudos são pautados na análise do desempenho da potência mecânica da MTG, uma vez que esta grandeza está diretamente relacionada com a capacidade de geração de energia elétrica. Tais análises consideram o uso de controladores de potência mecânica que atuam sobre a dinâmica da microturbina. Os reguladores propostos são baseados em algoritmo de otimização, visando à resposta ótima do sistema e um maior rendimento da máquina.

Nestes estudos, pode-se citar como referência o trabalho Ghadimi et al. (2012), que propõe a inserção de um controlador do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID) ao sistema de operação da microturbina, visando à regulação da potência de saída da máquina. Para realizar o controlador proposto, utilizou-se o algoritmo de otimização de enxame de partículas, (do inglês: *Particle Swarm Optimization, PSO*). De maneira similar, os autores de Mohammadi and Ghadimi (2013) propoem a adição de um controlador para regular a potência de saída de MTG em aplicações de GD no modo ilhado. Os autores optaram

por utilizar um controlador do tipo PID, e a sintonia dos coeficientes do regulador deu-se por meio de um algoritmo de otimização baseado em um algoritmo evolutivo.

Ainda, visando melhorias para o aprimoramento de eficiência da MTG, Zhu et al. (2019) propuseram uma estratégia de controle para o sistema de geração MTG através da metodologia do algoritmo de otimização das baleias (do inglês: *Whale Optimization Algorithm-WOA*). Já De Paepe et al. (2019) analisaram com precisão o desempenho de cada fator que compõe o sistema da MTG, e assim, utilizaram um algoritmo de otimização baseado em incertezas de estrutura clássica de otimização multiobjetivo, vinculado à uma técnica de propagação da incerteza visando à otimização da potência do sistema.

Diante deste contexto, o estudo apresentado no presente artigo traz a análise da inserção do controlador do tipo Proporcional Integral (PI) em malha fechada ao sistema de potência de uma MTG, visando aumentar a capacidade de resposta à demanda da MTG em sistemas de cogeração e GD. Adicionalmente, propõe-se um algoritmo de otimização para identificar os parâmetros de sintonia do regulador projetado. Ainda, neste estudo, propõe-se um modelo simplificado para execução do algoritmo de otimização visando diminuir o tempo computacional das simulações.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2, é apresentada a fundamentação teórica para a realização deste trabalho. Na terceira seção, descreve-se a metodologia utilizada para desenvolvimento das simulações e análises. Na quarta seção, são apresentadas as discussões e os resultados obtidos das simulações executadas. E, por fim, na seção de conclusão será abordada uma visão geral sobre o estudo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são abordados, de modo simplificado, os fundamentos teóricos e os aspectos gerais dos elementos que compõem o sistema da MTG e do algoritmo SIA proposto.

### 2.1 Microturbina a gás

A microturbina considerada neste estudo é a do tipo *single-shaft*, onde a MTG e o gerador elétrico estão acoplados em um mesmo eixo e rotacionam na mesma velocidade. Dessa forma, para realizar a conexão da máquina à rede elétrica, é necessário realizar o sincronismo com a frequência da rede. Para tal, a frequência de saída da máquina pode ser equiparada por meio de conversores eletrônicos CA/CC/CA, para então alimentar as cargas locais, possibilitando o fluxo bidirecional de potência ativa entre a concessionária e a máquina elétrica Rauber (2018). O modelo mais utilizado para modelagem das turbinas e microturbinas é o desenvolvido por Rowen (1983, 1992), onde a modelagem matemática consiste em blocos de controle de: velocidade, aceleração, temperatura, sistema de combustível e dinâmica de turbina, conforme apresentado na Figura 1.

Na Figura 1, as variáveis em questão representam:  $\omega_{ref}$  a velocidade nominal de referência da MTG;  $\omega_n$  a velocidade angular realimentada da máquina;  $V_{ce_v}$ ,  $V_{ce_a}$  e  $V_{ce_t}$  são respectivamente, os sinais de referência para os controladores de: velocidade, aceleração e temperatura que atuarão

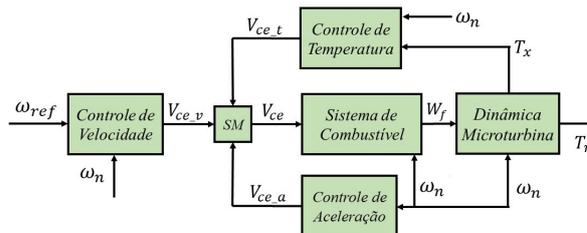


Figura 1. Simplificação dos blocos de controle da MTG.

no seletor mínimo (SM);  $V_{ce}$  é o sinal que atua no sistema de combustível;  $W_f$  é demanda de combustível;  $T_m$  é o torque mecânico e  $T_x$  a temperatura de exaustão.

O funcionamento da MTG consiste no controle de velocidade (atua sobre a carga), controle de temperatura (limita a potência de saída), e controle de aceleração (diminui os esforços mecânicos durante o arranque da máquina). Estes controladores visam manter o fluxo de combustível no nível adequado para o funcionamento do sistema de combustível. Na dinâmica da MTG, obtém-se o torque mecânico e a temperatura de exaustão, representando a parte de potência mecânica do sistema. Nesta etapa de operação da MTG, ocorre a transformação da energia química do combustível, provocando a expansão dos gases sobre o eixo da turbina. Esse processo faz com que esse eixo se movimente, caracterizando o torque da turbina, o qual aciona o gerador elétrico, e este, por sua vez, converterá a energia mecânica em elétrica (Rowen, 1983).

Uma das propostas deste estudo é a inserção do controlador tipo PI em malha fechada ao sistema de potência da MTG, visando aumentar a capacidade de resposta do sistema, cuja sintonia será obtida por meio do algoritmo de otimização SIA. A inserção do controlador de potência proposto é apresentada na Figura 2.

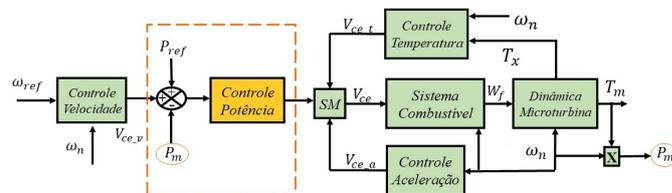


Figura 2. Inserção do controle de potência na MTG.

Na Figura 2, a parte destacada realça a inserção do controle de potência em malha fechada, integrado ao sinal de saída do controle de velocidade e  $P_{ref}$  é a referência de potência, em p.u,  $P_m$  é a potência desenvolvida pela turbina, em p.u.

### 2.2 Algoritmo de Otimização SIA

O algoritmo proposto neste trabalho é baseado no princípio de funcionamento do sistema imune natural adaptativo. A estrutura lógica do algoritmo SIA é apresentada por meio de um fluxograma na Figura 3.

Inicialmente, é gerada a população dos anticorpos (linfócitos B) de forma aleatória, que são as possíveis soluções para resposta ótima do sistema. Na etapa 2, a população de soluções candidatas geradas inicialmente é testada através do cálculo da função objetivo (FOB). Na etapa 3, os melhores indivíduos são selecionados para evolução

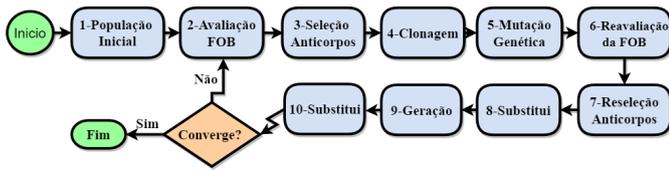


Figura 3. Fluxograma do algoritmo SIA.

do conjunto das soluções candidatas e em seguida, na etapa 4, os indivíduos selecionados na etapa anterior são clonados. Os clones passam para a etapa 5, onde ocorre a mutação (hipermutação somática). Assim, na etapa 6, é avaliado o conjunto de anticorpos gerados, verificando-se a afinidade da população de mutantes. A etapa 7 seleciona as melhores soluções candidatas, enquanto na etapa 8, realiza-se a substituição do conjunto de anticorpos com menor aptidão. Na etapa 9, ocorre uma geração limitada de novos anticorpos para introduzir diversidade na população.

Na etapa 10, realiza-se a substituição das soluções de pior aptidão, seguida da verificação do critério de convergência. Caso esse critério não seja alcançado, procede-se nova iteração a partir da etapa 2. Esse processo se repete até que o critério de parada previamente determinados seja atingido, como o número de gerações sem alteração da solução, finalizando o processo.

### 3. METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção, apresenta-se a metodologia proposta neste trabalho. O sistema é caracterizado por uma MTG conectada à rede trifásica, conforme apresentado na Figura 4.

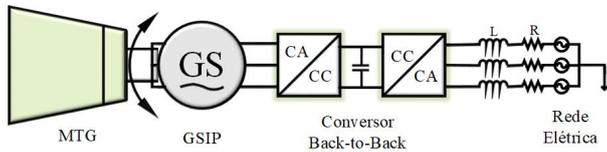


Figura 4. Topologia: MTG conectada à rede elétrica.

O sistema proposto na Figura 4 consiste em uma MTG do tipo *single-shaft* acoplada a uma máquina síncrona e está conectado à rede elétrica por conversor de potência. A rede elétrica é trifásica operando em 220 V a uma frequência de 60 Hz. Para testar a metodologia proposta, são feitas simulações do sistema utilizando o software Simulink/MATLAB®.

#### 3.1 Função Objetivo

A FOB do problema analisado neste estudo é fundamentada na relação da transferência da potência mecânica ao eixo do gerador elétrico, que é convertida em potência elétrica para conexão à rede. Dessa forma, a potência mecânica desenvolvida pela MTG durante o tempo de operação foi escolhida como variável de controle no presente trabalho, como pode ser visto na Figura 5.

em que  $f_{erro}$  é a função erro entre a  $P_{ref}$  e a  $P_m$ , T é o tempo de operação em segundos.

A Figura 5 apresenta a análise gráfica para determinação da FOB, cujo intuito é minimizar o erro de potência útil entre um valor correspondente de referência e o valor

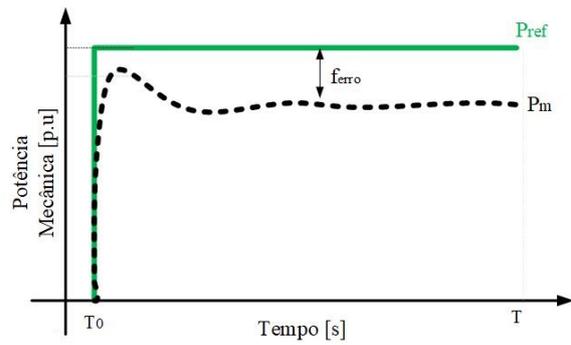


Figura 5. Análise gráfica da FOB.

real desenvolvido pela MTG. Portanto, a partir dessas considerações, a FOB é dada nas Eq. (1) e Eq.(2).

$$FOB = \min(f_{erro}) \quad (1)$$

$$f_{erro} = P_{ref} - P_m \quad (2)$$

A FOB está sujeita às restrições operativas. Estas restrições incluem os valores máximo e mínimo que os parâmetros do controlador PI pode assumir, sendo dadas na Eq. (3).

$$\begin{aligned} k_{p_{min}} < k_p < k_{p_{max}} \\ k_{i_{min}} < k_i < k_{i_{max}} \end{aligned} \quad (3)$$

em que  $k_{p_{min}}$  e  $k_{p_{max}}$ ,  $k_{i_{min}}$  e  $k_{i_{max}}$  representam os intervalos de operação para os parâmetros  $K_p$  e  $K_i$ . Para definição desses parâmetros limites, deve-se analisar a faixa de valores de operação que o controlador PI pode assumir dentro do sistema proposto.

Diante do estudo da modelagem matemática e do funcionamento do sistema, obteve-se a representação em diagrama de blocos (DB) da MTG no software Simulink, a qual foi utilizada para o desenvolvimento das simulações, sendo a representação em DB apresentada na Figura 6.

A Figura 6 apresenta a modelagem da MTG em DB no software, delineando os controles e o sistema de operação tais como: o controle de velocidade, o controle de temperatura, o sistema de combustível e a dinâmica da microturbina.

Atribuiu-se os dados ao modelo de Rowen (1983, 1992), de forma adaptada para a aplicação aqui proposta. Para realizar a simulação no Simulink, utilizou-se parâmetros que representam uma microturbina a gás de *Capstone C30*. A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros estruturais dessa MTG (Silva, 2020).

Os parâmetros apresentados na Tabela 1 foram obtidos por meio: da metodologia do trabalho Rauber (2018), do manual do fabricante da MTG C30 (CAPSTONE, 2005, 2015), da análise do trabalho Tavakoli et al. (2009).

#### 3.2 Algoritmo SIA

Como referido anteriormente, o algoritmo SIA será utilizado para obter os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do regulador PI. Desta forma, os parâmetros de simulação do SIA foram definidos da seguinte forma:

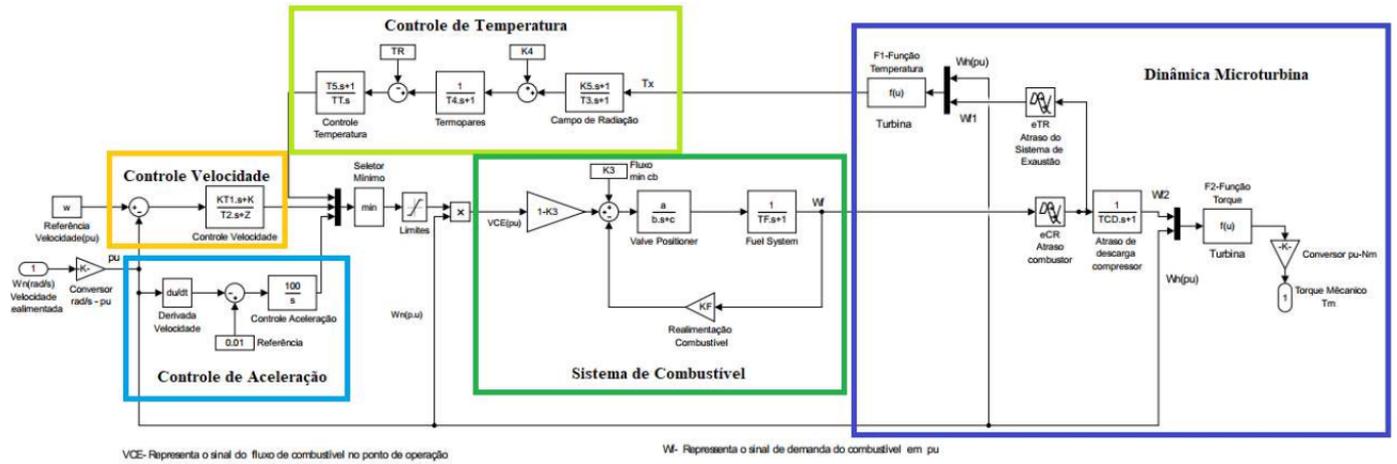


Figura 6. Modelagem da MTG em DB em software.

Tabela 1. Parâmetros de simulação MTG C30.

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
$a$	1 [-]	$b$	0,04 [s]
$c$	1 [-]	$z$	1 [-]
$e_{CR}$	0,005 [s]	$e_{TD}$	0,04 [s]
$K_1$	1,4455 [-]	$K_2$	0,50[-]
$K_3$	0,3082 [-]	$K_4$	0,85 [-]
$K_5$	0,15 [-]	$K_F$	1 [-]
$K$	25 [-]	$K_{T1}$	454 [-]
$T_1$	0,40 [s]	$T_2$	0,05 [s]
$T_3$	15 [s]	$T_4$	2,5 [s]
$T_5$	3,30 [-]	$T_6$	250 [-]
$T_{CD}$	0,00341 [s]	$T_F$	0,6675 [s]
$T_R$	275°C	$P_r$	30 [kW]
$V_{CEMIN}$	-0,10 [-]	$V_{CEMAX}$	1,5 [-]
$\omega_n$	96000 [rpm]	$\omega_{ref}$	1 [p.u.]

- Número de anticorpos do repertório (NAb): representa o número de soluções candidatas para sintonia do controlador. Estipulou-se o valor 100 soluções, e ainda, analisou-se a eficiência do algoritmo com repertórios de 50, 30 e 25 soluções candidatas;
- Número máximo de gerações (Nmaxger): representa o número de iterações do SIA para convergência no conjunto de 25, 30, 50 e 100 iterações;
- Número de gerações sem mudança na solução ótima (gest): é o critério de convergência para estagnação do algoritmo sem aprimoramento da melhor solução encontrada, definido como 10.

As combinações dos valores dos parâmetros descritos anteriormente são realizadas para testar qual apresentará a melhor relação de custo-benefício entre esforço computacional e qualidade da solução. Foram realizadas 200 simulações, divididas em 50 simulações para cada combinação de parâmetros da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de simulação SIA.

Parâmetros	1	2	3	4
$N_{Ab}$	100	50	30	25
$N_{maxger}$	100	50	30	25

O algoritmo SIA foi simulado conforme os parâmetros da Tabela 2, gerando-se os valores otimizados dos ganhos do controlador PI,  $K_{po}$  e  $K_{io}$ , para sintonia do controlador de

potência proposto. O índice "o" dos ganhos dos controladores proporcional e integral refere-se ao ganho otimizado.

### 3.3 Modelo de simulação simplificado

Para realizar as simulações em tempo viável é proposto um modelo simplificado. O modelo simplificado envolve apenas a MTG, onde a velocidade realimentada ao sistema é representada por uma fonte de entrada do tipo degrau, que emula a forma correlata ao comportamento dinâmico da velocidade angular proveniente da máquina síncrona. O fluxograma das simulações realizadas neste estudo está representado na Fig. 7.



Figura 7. Fluxograma de simulações propostas.

O sistema completo será simulado para verificar o comportamento dinâmico da potência mecânica da MTG conectada à rede sem o controlador de potência (CP) proposto. Na sequência, define-se o modo de operação do algoritmo SIA e realiza a simulação deste para a sintonia do CP da MTG conectado à rede. O próximo passo é testar o algoritmo SIA aplicado no modelo de MTG simplificado. Os resultados dos modelos completos e simplificados são comparados, avaliando-se o potencial de operação do modelo simplificado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados obtidos por meio das simulações do sistema delineado. A primeira análise a ser considerada é a potência mecânica do sistema da MTG conectada à rede sem o controle proposto, cujo resultado obtido é apresentado na Figura 8.

Como pode ser observado na Figura 8, a potência mecânica tem forma de onda com perfil oscilatório com uma geração em torno de 0,80 p.u., como esperado para sistema de MTG, sendo possível otimizar a operação para que aumente o desempenho do sistema.

O segundo item analisado foi a viabilidade do modelo simplificado. Foram realizadas 200 simulações no mesmo.

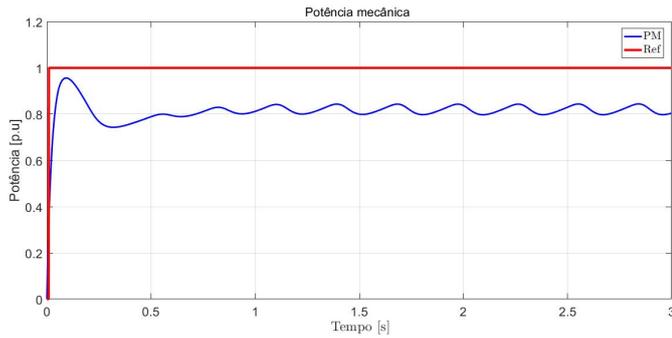


Figura 8. Análise potência mecânica da MTG.

Estas foram divididas igualmente nos subgrupos de análises considerados. Os resultados estatísticos provenientes da simulação do algoritmo SIA no sistema simplificado estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados-modelo simplificado.

Parâmetros	25	30	50	100
Converge	50%	62%	64%	70%
Não converge	50%	38%	36%	30%
$Temp_{min}$	72,84 s	89,86 s	130,24 s	295,73 s
$Temp_{max}$	78,13 s	98,01 s	199,70 s	360,11 s

A Tabela 3 apresenta o tempo mínimo e máximo de execução e o percentual de simulações do algoritmo SIA no modelo simplificado nas diferentes condições de operação, delineadas na Tabela 2. Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o grupo em que o algoritmo convergiu em maior percentual foi o grupo de  $N_{Ab} = 100$ ,  $N_{maxger} = 100$  e  $gest = 10$ , com um tempo considerável de simulação.

Os resultados obtidos do algoritmo SIA na sintonia do controle de potência mecânica no sistema simplificado quando este convergiu, Figura 9, e quando não convergiu, Figura 10, isto é, a sintonia do controlador não atingiu a referência proposta.

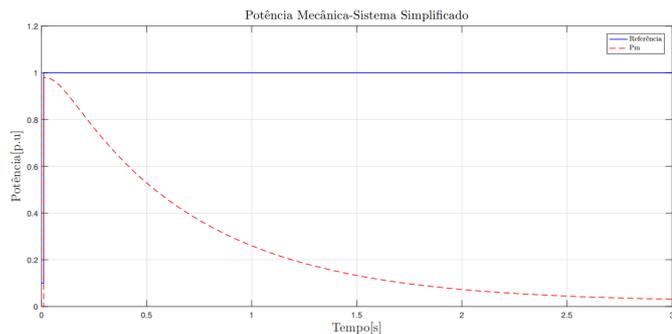


Figura 9. Modelo simplificado - Não Convergiu.

Após testar o algoritmo no modelo SIA ao modelo simplificado, realizou-se a simulação do sistema completo com o algoritmo SIA. Para realizar tal simulação utilizou-se os parâmetros  $N_{Ab} = 25$ ,  $N_{maxger} = 25$  e  $gest = 10$ . O algoritmo demorou 72 horas para realizar a otimização de sintonia do controlador. A simulação convergiu para solução ótima e os parâmetros encontrados foram:  $k_{po} = 13,8$  e  $k_{io} = 14,9$ .

Como já apresentado, o tempo mínimo de simulação do sistema completo foi de 72 horas, enquanto para o

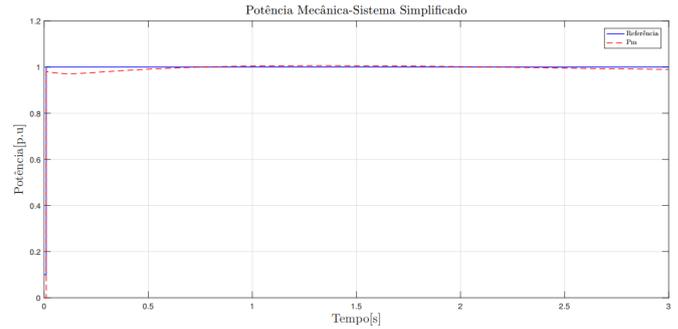


Figura 10. Modelo simplificado - Convergiu.

modelo simplificado o menor tempo de execução foi de 72,84 segundos. Para realizar a simulação com o grupo que teve o melhor desempenho, o tempo mínimo de simulação é cerca de 290 horas, desse modo a utilização do modelo simplificado propicia resultados satisfatórios, principalmente com relação ao tempo computacional.

Ainda, analisando a potencialidade do modelo simplificado, verificou-se que os valores  $k_{po}$  e  $k_{io}$  obtidos por meio da execução do algoritmo no modelo simplificado são capazes de operar e comparou a resposta com os ganhos obtidos na simulação do sistema completo, conforme ilustrado na Figura 11.

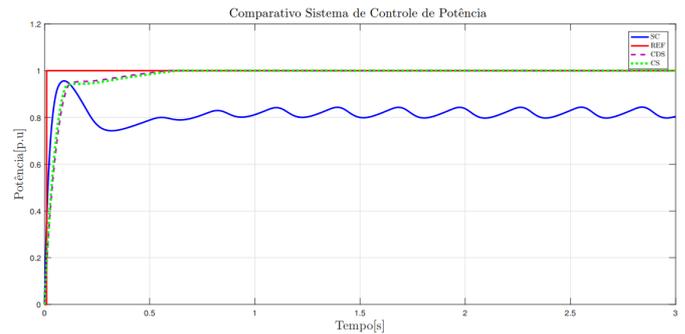


Figura 11. Comparativos entre os controladores .

Analisando a Figura 11 a curva em vermelho é a referência, a curva em azul é o sistema sem controle de potência (SC), a curva em verde tracejada é a implementação do SIA no sistema completo (CS) e a curva roxo é o resultado da utilização dos ganhos do controlador obtidas por meio do modelo simplificado de otimização (CDS), aplicadas ao modelo completo de simulação. É possível observar que as formas de onda provenientes da sintonia do controlador do sistema completo (cor verde) e forma de onda (cor roxa) advinda dos ganhos do sistema simplificado apresentaram comportamentos bem similares. Assim, é possível verificar que o modelo simplificado proposto é efetivo para o controle desejado.

É possível constatar a eficácia do controlador de potência mecânica proposto, ao comparar as formas de onda do sistema sem controle de potência (curva em azul) e as curvas proveniente do controle de potência (curva verde e roxo). Verifica-se que o algoritmo SIA conseguiu otimizar a geração de potência mecânica, anulando o erro de estado estacionário, corroborando o controle proposto e a efetividade do algoritmo para realizar a sintonia do controlador.

## 5. CONCLUSÃO

Esse artigo apresentou uma aplicação do algoritmo de otimização SIA para sintonia do controle de potência de uma MTG. Por meio da inserção do controlador e a definição adequada dos parâmetros foi possível verificar o comportamento dinâmico da MTG, que se apresentou estável ao longo do tempo mostrando-se, desse modo, satisfatório quanto à proposta inicial deste trabalho.

Da análise dos resultados em relação à resposta do sistema de controle de potência adicional, estes indicam que a estratégia de controle proposta pode atingir os objetivos esperados e é adequada para microturbinas conectadas a sistemas de geração de energia como os sistemas de geração distribuída, uma vez que o controle proposto aumenta a eficiência na geração de energia elétrica, possibilitando um maior aproveitamento energético.

E ainda, das análises dos resultados desta pesquisa, verificou-se que o sistema simplificado, no qual foram realizados os testes do algoritmo SIA, apresentou resultados satisfatórios ao ser comparado com o sistema completo, isto é, os resultados obtidos foram condizentes com o esperado, a resposta ao controle com a sintonia do algoritmo SIA apresentou uma resposta estável ao longo do tempo e um tempo reduzido de simulação. O modelo simplificado e algoritmo SIA foram validados por meio de simulações computacionais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE), FAPEMIG, CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), INERGE e ao grupo de pesquisa Smart4Grids pelo apoio a este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- CAPSTONE (2005). Capstone microturbines user's manual. Technical report, Capstone Turbine Corporation. Available at: [wmrc.edu/projects/BAREnergy/manuals/c-30-manuals/400001\\_C30\\_C60\\_MicroTurbine\\_Users\\_Manual.pdf](http://wmrc.edu/projects/BAREnergy/manuals/c-30-manuals/400001_C30_C60_MicroTurbine_Users_Manual.pdf). Access in: 11/02/2021.
- CAPSTONE (2015). Microturbina casptone. Technical report, Capstone Turbine Corporation. Available at: <https://www.capstoneturbine.com/products/c30/>, Access in: 23/01/2021.
- De Paepe, W., Coppitters, D., Abraham, S., Tsirikoglou, P., Ghorbaniasl, G., and Contino, F. (2019). Robust operational optimization of a typical micro gas turbine. *Energy Procedia*, 158, 5795–5803.
- Ghadimi, N., Danandeh, A., and Ghadimi, R. (2012). Adjustment of pid coefficients in order to control of load power of microturbine in island mode using pso. *Research Journal of Information Technology*, 4(1), 18–22.
- HA, M.P., Huy, P.D., and Ramachandaramurthy, V.K. (2017). A review of the optimal allocation of distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 293–312.
- Mohammadi, M. and Ghadimi, N. (2013). Designing controller in order to control microturbine in island mode using ep algorithm. *Scientific Research and Essays*, 8(42), 2100–2107.
- Moreira, A.F.d.S. (2018). *Regulação no Mercado de Energia Elétrica para Micro e Miniprodutores*. Mestrado em direito, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Nelson, J., Johnson, N.G., Doron, P., and Stechel, E.B. (2018). Thermodynamic modeling of solarized microturbine for combined heat and power applications. *Applied energy*, 212, 592–606.
- Rauber, J.G. (2018). *Avaliação de Modelos de Microturbina a Gás Single Shaft para Estudos de Microgeração Distribuída com Cogeração Térmica*. Mestrado engenharia elétrica, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Paraná Brasil.
- Rowen, W.I. (1983). Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines. *Journal of Engineering for Power*, 105, n.4, 865–882.
- Rowen, W.I. (1992). Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service. *American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 1–7.
- Silva, W.d.N. (2020). *Otimização operacional de microturbinas a gás para aplicações de geração distribuída*. Mestrado engenharia elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brasil.
- Silva, W.d.N., de Oliveira, J.G., Dias, B.H., and de Oliveira, L.W. (2019). Gas microturbines for distributed generation system. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6. IEEE, Santos, São Paulo.
- Tavakoli, M.R.B., 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.
- Zhu, J., Wang, X., Xie, D., and Gu, C. (2019). Control strategy for mgt generation system optimized by improved woa to enhance demand response capability. *Energies*, 12(16), 3101.