

Fuzzy PID Controller Design for LFC in Electric Power Systems

C. Osinski, G. Villar, and G. da Costa

Abstract—In this paper, a methodology using Differential Evolution algorithm is proposed for the definition of the discourse universe of the fuzzy PID controller structure variables, for the load/frequency control in power systems, with this eliminating the need of the expert in systems speed control of hydraulic turbines. This controller uses the fuzzy system to tune the PID controller in real time. A mathematical model, based upon constructive information and where nonlinearities are taken into account, of a hydroelectric plant belonging to the Brazilian Interconnected System is presented as a test benchmark to analysis the proposed controller performance under various loading conditions. Simulation results are introduced to show the performance of the developed controller in comparison with a PID controller tuned by a Differential Evolution Algorithm and with a PID algorithm similar to the one actually used in the field. These results denote that the proposed controller offer better performance over others in terms of settling times and oscillation of the frequency.

Index Terms—Fuzzy PID controller, hydroelectric turbine, frequency control.

I. INTRODUÇÃO

UM Sistema Elétrico de Potência (SEP) consiste de muitos elementos individuais conectados a fim de formar um sistema dinâmico grande e complexo capaz de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica através de uma grande área geográfica [1]. Um dos grandes desafios do SEP é operar adequadamente mesmo na presença constante de variações de carga e outras perturbações. Um dos conceitos relacionados a este desafio é a estabilidade de frequência [2]. Esta estabilidade refere-se à capacidade do SEP de manter a frequência em torno de seu valor nominal após a ocorrência de um distúrbio ou perturbação, resultando num equilíbrio entre a geração e a carga.

O Controle de Carga/Frequência (LFC) de um SEP, por sua vez, desempenha um papel importante no ajuste das saídas do gerador de acordo com as mudanças de carga. A ação de controle é indispensável para manter a frequência do sistema em seus valores especificados [3], [4]. Em vista disso, diversas metodologias de controle, como controle ótimo e controle robusto têm sido aplicadas ao problema de controle de carga e frequência durante as últimas décadas, como pode ser visto em [5] e [6] para uma pesquisa mais abrangente na área.

No entanto, sabe-se que o sistema elétrico possui um comportamento não linear e complexo, onde os parâmetros

do sistema são uma função do ponto de operação e o carregamento no sistema de potência nunca é constante. Logo, o ajuste do controlador torna-se uma tarefa desafiadora no contexto do LFC. Em vista disso, admite-se que um controlador com parâmetros fixos sintonizado para um determinado ponto de operação pode não ser o mais adequado em todas as condições operacionais.

Ao longo dos anos, com o intuito de melhorar o desempenho dos controladores, diversos pesquisadores vêm utilizando técnicas de inteligência artificial para ajustar os ganhos dos controladores PID em tempo real [7]–[9], como pode ser visto em [10], onde os autores desenvolveram um controlador PID, cujo os ganhos K_i e K_d são mantidos fixos, enquanto o ganho K_p é atualizado por um sistema *fuzzy*. Já no trabalho de [11], um sistema *fuzzy* é utilizado para sintonizar o ganho integral de um controlador PID para o controle de velocidade de turbinas hidráulicas. Finalmente, em [12], os autores utilizam um sistema *fuzzy* para sintonizar os três ganhos do controlador PID.

Diferentemente dos artigos citados, este trabalho utiliza um algoritmo de evolução diferencial (ED) para encontrar os ganhos ótimos de um controlador PID em diversos pontos de operação do sistema elétrico de potência. A partir destes ganhos encontrados, os universos de discurso das variáveis de saída do sistema *fuzzy* podem ser então devidamente configurados ponderando os maiores e menores ganhos encontrados, com isto elimina-se a necessidade do especialista em sistemas de controle de velocidade de turbinas hidráulicas, que determinaria este universo de discurso, desta forma a metodologia proposta neste trabalho menos imune a erros humanos. Quando em funcionamento o sistema *fuzzy* torna os ganhos do PID adaptativos, e com isso, escolhe o melhor valor para determinada condição de carga. Assim, sempre que houver alguma variação de carga ou algum distúrbio no sistema elétrico de potência, o sistema *fuzzy* atualizará o controlador PID em tempo real. Desta maneira, o controlador apresentado tende a ter um desempenho ótimo, mesmo na presença de perturbações.

Para a validação do controlador PID *fuzzy* com parâmetros ajustáveis em tempo real para o problema de carga e frequência, um estudo de caso será realizado com um modelo matemático, obtido com medições em campo, de uma usina hidrelétrica (UHE) pertencente ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esta UHE possui três geradores síncronos com uma capacidade de 133 MW cada, totalizando uma geração de 399 MW. Cada gerador está conectado a uma turbina Francis. A UHE está conectada ao SIN através de duas linhas de transmissão.

O artigo está estruturado como se segue. Na Seção II, a revisão sobre a modelagem detalhada do sistema de controle de frequência de uma UHE é apresentada. Na Seção III tem-se

C. Osinski, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil, osinski.cristiano@gmail.com

G. V. Leandro, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil, gede@ufpr.com.br

G. H. C. Oliveira, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil, gustavo@ufpr.com.br

a apresentação e a sintonia do controlador proposto, seguido pela Seção IV, onde por um lado, dados do modelo da UHE e os estudos de caso são apresentados e, por outro lado, o desempenho do controlador proposto é comparado com outras estratégias PID. Finalmente, na Seção V, as conclusões são apresentadas.

II. MODELO DA MALHA HIDRÁULICA

A correta modelagem matemática dos componentes que compõe a UHE é de fundamental importância para a sintonia dos parâmetros do controlador/regulador de velocidade da turbina. De acordo com [13] e [14], a malha de controle de velocidade de uma UHE é composta pelo controlador, amplificador hidráulico, conjunto conduto/turbina e gerador/carga, como pode ser visto na Fig. 1.



Fig. 1. Malha de controle de velocidade.

A função do controlador é manter a frequência do sistema em valores nominais mesmo na presença de perturbações, gerando o sinal de controle que será aplicado ao amplificador hidráulico. Apesar do avanço das técnicas de controle, a grande maioria das usinas hidrelétricas ainda utilizam controladores PID para fazer o controle de carga e frequência. Dentre os blocos que compõe a malha de controle de velocidade, tem-se o amplificador hidráulico (Fig. 2), que transforma o sinal de controle em um sinal de potência mecânica capaz de realizar a abertura e o fechamento do distribuidor (gate), mesmo na presença das fortes pressões do fluxo hidráulico no conduto.

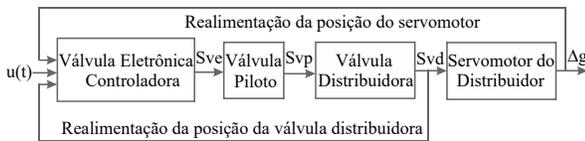


Fig. 2. Amplificador hidráulico.

Estes amplificadores são caracterizados pela alta durabilidade e capacidade de produzir uma força poderosa com resposta de velocidade rápida. Alguns modelos de amplificadores hidráulicos podem ser vistos em [13], [15]–[17]. Com base na Fig. 2, pode-se inferir que para um bom projeto de controle do regulador de velocidade é necessário ter modelos adequados dos componentes aí presentes. Em vista disso, a seguir serão mostrados os modelos matemáticos dos subsistemas relacionados ao diagrama de blocos da Fig. 2. Estes modelos são baseados em [14], onde os autores apresentam de forma detalhada os modelos matemáticos das válvulas presentes no amplificador hidráulico.

A estrutura da válvula eletrônica controladora é mostrada na Fig. 3. As entradas correspondem à medição da posição da válvula distribuidora (Svd), ao sinal de controle $u(t)$ oriundo do controlador e à medição do distribuidor (Δg). Os ganhos

K_1 e K_2 podem ser ajustados pelo usuário através da IHM da malha de controle da usina e o bloco de saturação representa a limitação (L_1 à L_2) do conversor D/A do sistema de controle da usina. O modelo termina com um conversor da base para volts. A saída, portanto, representa o sinal de tensão (em Volts) que será enviado para a válvula piloto.

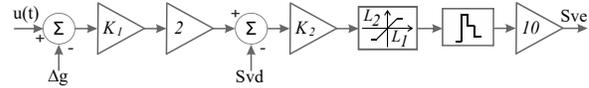


Fig. 3. Válvula eletrônica controladora.

A válvula piloto é o dispositivo que transforma os sinais elétricos de controle em um deslocamento mecânico-hidráulico proporcional, atuando diretamente na válvula distribuidora. A válvula piloto pode ser vista na Fig. 4. A entrada deste sistema é a saída da válvula eletrônica controladora (Sve). Os parâmetros K_3 e T_p representam a dinâmica da válvula e os blocos na sequência representam a histerese da válvula e os limites operacionais do equipamento. A saída, portanto, representa o deslocamento da válvula piloto (Svp) em milímetros [14].



Fig. 4. Válvula piloto.

A válvula distribuidora é modelada conforme Fig. 5. O sinal da válvula piloto define a abertura ou fechamento da válvula distribuidora, com isso tem-se dois ganhos, sendo $K(Svp) = K_4$ se $Svp > 0$ e $K(Svp) = K_5$ se $Svp < 0$, onde cada um corresponde ao sentido do movimento de deslocamento da válvula [14], L_5 e L_6 são os limites operacionais da válvula. A saída representa o deslocamento da válvula distribuidora (Svd) em milímetros.

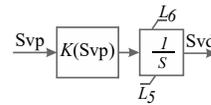


Fig. 5. Válvula distribuidora.

O servomotor do distribuidor é modelado de forma similar a representação da válvula distribuidora, como pode ser visto na Fig. 6. Uma não linearidade do tipo zona morta, representando o recobrimento da válvula, é inclusa no modelo. A entrada deste sistema é a saída da válvula distribuidora (Svd). O sinal da válvula distribuidora define a abertura ou fechamento do servomotor do distribuidor, com isso tem-se dois ganhos, sendo $K(Svd) = K_6$ se $Svd > 0$ e $K(Svd) = K_7$ se $Svd < 0$, sendo cada um correspondente ao sentido do movimento de deslocamento do servomotor e a saída deste sistema é o deslocamento do servomotor (L_7 à L_8).

O modelo do conjunto conduto/turbina utilizado neste trabalho (Fig. 7) é o modelo não linear proposto em [18]. Para a concepção deste modelo, os autores assumiram algumas hipóteses simplificadoras, como por exemplo: sem chaminé de

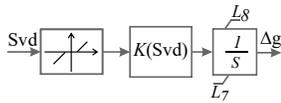


Fig. 6. Servomotor distribuidor.

equilíbrio; os efeitos do golpe de aríete na tubulação são desprezados; coluna de água inelástica; a água é incompressível e a resistência hidráulica é desprezível. Este modelo faz a relação entre a abertura do distribuidor e a potência mecânica que irá para o gerador.

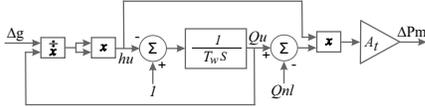


Fig. 7. Modelo não-linear turbina.

Neste modelo, ΔP_m é a potência mecânica, A_t é a relação para mudança de base da turbina para o gerador, Q_u é a vazão, h_u é a altura da queda, Q_{nl} é a vazão necessária para suprir as perdas a vazão da turbina e T_w é a constante de tempo de inércia da água. Através do gerador síncrono (Fig. 8), a potência mecânica é transformada em potência elétrica.

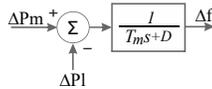
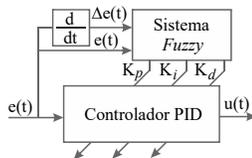


Fig. 8. Modelo gerador.

O modelo do gerador é uma das principais partes de uma planta hidrelétrica, já que é o responsável por gerar eletricidade [17]. Neste modelo, ΔP_l é a variação na potência elétrica consumida da carga, Δf é a frequência da máquina, T_m é a constante de tempo do gerador e D é o coeficiente de amortecimento.

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE PROPOSTA

Neste trabalho, faz-se o uso da estrutura do controlador PID *fuzzy* com parâmetros ajustáveis em tempo real, para o controle de velocidade de máquinas hidráulicas. Nesta estratégia de controle, o sistema *fuzzy* atualiza simultaneamente todos os ganhos do PID. A estrutura desse controlador pode ser vista na Fig. 9.

Fig. 9. Estrutura do controlador PID *fuzzy*.

Propõe-se aqui o uso de algoritmos de otimização (meta-heurísticas) para a definição do universo de discurso das variáveis de saída do sistema *fuzzy*, portanto não há a necessidade do especialista, além disso há o intuito de trazer

robustez, aumentar a precisão e tornar o sistema de controle menos empírico.

Na Fig. 9, o erro $e(t)$ está relacionado aos desvios de velocidade da turbina em relação ao valor nominal ($\Delta f(t)=0$), em função da variação da demanda de carga. Com isto, o sistema *fuzzy* detecta o erro de velocidade e atualiza os valores do controlador PID (1), que por sua vez, gerará os sinais de controle $u(t)$, que atuam como sinais de referência para o sistema de controle de posição do servomotor principal.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

Pelo fato de o universo de discurso do sistema *fuzzy* ser otimizado por um algoritmo de evolução diferencial e pelo fato do controlador PID *fuzzy* possuir a habilidade de autoajustar-se, espera-se que este controlador apresente um bom desempenho no sistema de controle de velocidade da usina sob estudo.

A. Sintonia do Controlador Proposto

O primeiro passo para a sintonia do controlador proposto é a execução da metaheurística Evolução Diferencial (ED). Esta é utilizada para encontrar os ganhos ótimos do controlador PID em diferentes pontos de operação da UHE, aqui definidos como n . O algoritmo de Evolução Diferencial (ED) foi escolhido por ser uma metaheurística baseada na teoria da evolução natural [19], sendo uma técnica de busca, relativamente simples tendo como operações básicas: a seleção, a reprodução, o cruzamento e a mutação. O pseudocódigo utilizado encontra-se descrito a seguir [20] [21]:

Algoritmo 1: Algoritmo de Evolução Diferencial

- 1 Gerar população aleatoriamente
 - 2 Avaliar a aptidão de cada indivíduo da população
 - 3 **para** critério de parada melhor indivíduo **faça**
 - 4 Mutação
 - 5 Avaliar a aptidão de cada indivíduo da nova população
 - 6 Cruzamento
 - 7 Seleção
 - 8 Avaliar a aptidão da nova população
 - 9 **se critério de parada for aceito**
 - 10 fim
 - 11 **se não** voltar ao início
-

Uma vez tendo sido calculado o conjunto de valores ótimos de $\{K_p^i, K_i^i, K_d^i\}_{i=1, \dots, n}$ para cada um dos n pontos de operação, define-se o universo de discurso conforme as equações (1), (2) e (3).

$$K_p = [0, 8 \min K_p^i \quad 1, 2 \max K_p^i]_{i=1, \dots, n} \quad (2)$$

$$K_i = [0, 8 \min K_i^i \quad 1, 2 \max K_i^i]_{i=1, \dots, n} \quad (3)$$

$$K_d = [0, 8 \min K_d^i \quad 1, 2 \max K_d^i]_{i=1, \dots, n} \quad (4)$$

Com os universos de discurso das variáveis de saídas definidos, parte-se para a definição das funções de pertinência e para a escolha das regras que irão definir o comportamento do sistema [22], [23]. A base de regras relaciona as variáveis do controlador, obtendo conclusões a partir das variáveis de entrada e de saída [24]–[28].

Resumidamente, tem-se os seguintes passos para a definição do sistema *fuzzy* que irá sintonizar o controlador: (1) Executar o algoritmo de evolução diferencial para n pontos de operação da UHE e obter então $nx3$ valores de ganhos do controlador PID; (2) Baseando-se nos valores mínimos e máximos do controlador PID encontrados pelo algoritmo ED, definir o universo de discurso das variáveis de saída do sistema *fuzzy*; (3) Definir as funções de pertinência das entradas e das saídas do sistema *fuzzy*; (4) Definir as regras de inferência do sistema *fuzzy*; (5) Determinar os valores dos ganhos pelo método Centro da Área.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da aplicação do controlador no controle de velocidade de uma UHE que fica localizada na região sudeste do Brasil. Esta UHE gera energia elétrica através de três máquinas síncronas, cada uma com potência de 133 MW, totalizando uma geração de 399 MW, com turbinas tipo Francis. O diagrama unifilar do sistema elétrico, em que a usina sob estudo pertence, encontra-se na Fig. 10. A usina sob estudo fica localizada na Barra 1. O modelo matemático desta UHE foi definido na Seção II, e os valores dos componentes podem ser vistos na Tabela I.

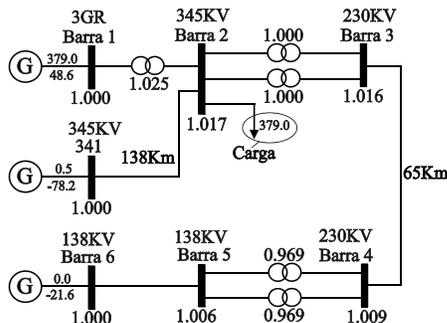


Fig. 10. Diagrama unifilar do sistema elétrico.

Quatro estudos de casos serão analisados, todos têm como sinal de saída o comportamento da frequência das máquinas da UHE sob condições de transitórios eletromecânicos gerados pela mudança do modo de operação interligado para o modo ilhado. Nos casos simulados, pouco depois do ilhamento da UHE do SIN, a demanda de energia é diferente da demanda após o ilhamento. Isso causa um transiente de frequência até o retorno ao novo regime permanente. Para fins de simulação, o transiente da potência elétrica da carga foi calculado via o *software* Anatem[®] e depois utilizado no *software* Matlab[®].

A estratégia de controle proposta neste trabalho será comparada com outras duas estratégias de controle. A primeira trata-se de um controlador PID que, atualmente, está em uso na UHE sob estudo, cuja saída simulada no *software*

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DA PLANTA

Parâmetros	Valor
Ganho da válvula de controle (K_1)	4
Ganho da válvula de controle (K_2)	2
Limite inferior da válvula eletrônica de controle (L_1)	2
Limite superior da válvula eletrônica de controle (L_2)	2
Ganho da válvula piloto (K_3)	2,62
Constante de tempo da válvula piloto (T_p)	2
Limite inferior da válvula piloto (L_3)	2
Limite superior da válvula piloto (L_4)	2
Ganho da válvula distribuidora (K_4)	4,62
Ganho da válvula distribuidora (K_5)	4,03
Limite inferior da válvula distribuidora (L_5)	2
Limite superior da válvula distribuidora (L_6)	2
Ganho do servomotor do distribuidor (K_6)	9,01
Ganho do servomotor do distribuidor (K_7)	17,237
Limite inferior do servomotor (L_7)	2
Limite superior do servomotor (L_8)	2
Constante de tempo de inércia da água (T_w)	2,71
Vazão para suprir as perdas a vazão da turbina (Q_{nl})	0,12
Relação para mudança de base (A_f)	1,12
Constante de tempo do gerador (T_m)	0,45
Coefficiente de amortecimento (D)	0,5

Anatem[®] foi validada com a saída obtida em ensaio de campo para um degrau de potência. Este controlador possui os seguintes parâmetros: $K_p = 2,5$; $K_i = 0,125$ e $K_d = 0,15$. Os ganhos deste PID foram determinados em campo, na fase de comissionamento, seguindo a recomendação da concessionária e do fabricante, utilizando o critério de rede isolada com estatismo transitório e tempo de amortecimento.

A segunda estratégia de controle utilizada na comparação, é um controlador PID sintonizado através de um algoritmo de Evolução Diferencial (ED). Para a sintonia deste controlador PID foram utilizados 5 pontos de operação (10%, 30%, 50%, 70% e 90% da potência nominal da UHE) e os parâmetros escolhidos foram aqueles que melhor representavam a saída de todos os pontos de operação simultaneamente. Os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos desta forma são: $K_p = 1,5$; $K_i = 0,12$ e $K_d = 0,14$.

A. Sintonia do Controlador Proposto

Para fazer a sintonia dos controladores PID através do algoritmo ED, utilizou-se os parâmetros da Tabela II. Para cada ponto de operação da UHE, executou-se o algoritmo de Evolução Diferencial 100 vezes, utilizando como função de avaliação (*fitness*) o erro de frequência, tomando como parâmetros do controlador o valor da combinação que mais se repetiu. Foram utilizados os pontos de operação 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da potência nominal da UHE. Assim, chegou-se aos valores da Tabela III.

Em função dos valores de cada ganho da Tabela III, e com uma variação de 20% dos valores máximos e mínimos define-se os universos de discursos das variáveis de saída do controlador, conforme tabela IV.

O universo de discurso das variáveis de entrada ($e(t)$ e $\Delta e(t)$) são $[-0,15 \ 0,5]$ e $[-0,5 \ 0,1]$, respectivamente. Neste trabalho, utilizou-se cinco funções de pertinência para as entradas e cinco funções de pertinência para as saídas. Estas foram definidas como: Muito Negativo (MN), Pouco Negativo

TABELA II
PARÂMETROS DO ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Parâmetro	Valor utilizado
Tamanho da população	30
Taxa de cruzamento	0,7
Taxa de mutação	0,2 a 0,8
Estratégia de mutação	<i>best/1/bin</i>
Número de iterações máxima	500
Crítério de parada (MSE)	0,001
Número de variáveis estimadas	3

TABELA III
GANHOS ÓTIMOS DO CONTROLADOR PID

Parâmetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
K_p	1,8	1,5	1,7	1,5	1,4
K_i	0,18	0,15	0,11	0,19	0,17
K_d	0,11	0,2	0,09	0,08	0,13

TABELA IV
UNIVERSO DE DISCURSO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO CONTROLADOR

Variável	Faixa de operação
K_p	[1,12 2,16]
K_i	[0,022 0,228]
K_d	[0,064 0,156]

(PN), Zero (Z), Pouco Positivo (PP) e Muito Positivo (MP). As funes de pertinência so modeladas de forma que em torno do zero as variaveis assumem valores de pertinência nos conjuntos Zero, Pouco Negativo e Pouco Positivo e, ao passo que vo aumentando ou diminuindo assumem pertinências maiores nestes ltimos dois conjuntos at ativarem os conjuntos nebulosos Muito Negativo ou Muito Positivo. Com isto, possvel criar regras distintas de acionamento das variaveis de sada para quando a resposta transiente estiver muito longe da estabilizao. A configuração das funções utilizadas nas variáveis de entrada e saída podem ser vistas na Fig. 11.

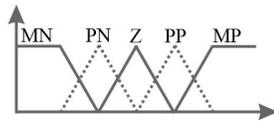


Fig. 11. Funções de pertinência do controlador PID *fuzzy*.

Após a definição do universo de discurso das variáveis de entrada e saída do sistema *fuzzy* e das funções de pertinência, parte-se para a escolha das regras que irão definir o comportamento do sistema. O conjunto de regras proposto neste trabalho que relaciona as entradas com as saídas K_p , K_i e K_d pode ser visto nas Tabelas V, VI e VII, respectivamente.

TABELA V
REGRAS DE INFERÊNCIA K_p

e(t)	$\Delta e(t)$				
	MN	PN	Z	PP	MP
MN	Z	PP	Z	PN	PP
PN	Z	PP	Z	PN	PP
Z	PN	PP	PP	PN	PP
PP	PP	PN	PP	Z	PP
MP	Z	PN	Z	PN	PP

TABELA VI
REGRAS DE INFERÊNCIA K_i

e(t)	$\Delta e(t)$				
	MN	PN	Z	PP	MP
MN	PN	PP	Z	PN	PP
PN	PN	Z	PP	PN	Z
Z	MN	Z	Z	PN	PN
PP	PP	Z	PP	Z	MN
MP	Z	PN	Z	PN	PP

TABELA VII
REGRAS DE INFERÊNCIA K_d

e(t)	$\Delta e(t)$				
	MN	PN	Z	PP	MP
MN	PP	MN	Z	PN	Z
PN	PN	Z	PP	PN	MN
Z	PP	Z	PN	Z	PN
PP	MN	PN	PP	Z	PP
MP	PP	PN	Z	PN	PP

Para o processo de defuzzificação foi utilizado o método Centride. A partir das regras das Tabelas V, VI e VII, foram gerados gráficos de superfícies tridimensionais que possibilitam visualizar os efeitos das mesmas sobre as entradas e saídas do sistema.

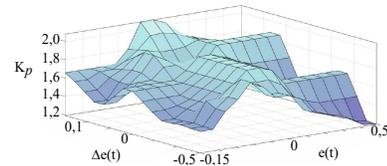


Fig. 12. Superfície tridimensional K_p .

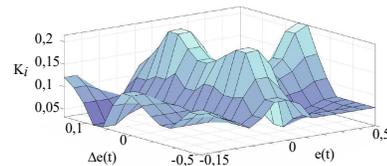


Fig. 13. Superfície tridimensional K_i .

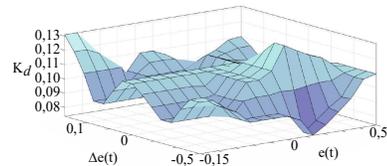


Fig. 14. Superfície tridimensional K_d .

As Fig. 12, 13 e 14 mostram os gráficos de superfície para as saídas K_p , K_i e K_d , respectivamente. Estes gráficos retratam quão regular foi a base de regras desenvolvida. Assim como, a continuidade, a transição e a simetria são características bem expressas nestas figuras. Na sequência, quatro situações distintas de ilhamento serão consideradas.

B. Caso I

A primeira condição de operação analisada, simula a desinterligação da UHE do SIN, e uma diminuição da carga.

Inicialmente, a geração da UHE estava em 95% do valor nominal e, após a desinterligação do SIN a carga remanescente é de 50% do valor nominal de geração que é de 399MW, devendo a UHE atender esta demanda de carga de forma isolada.

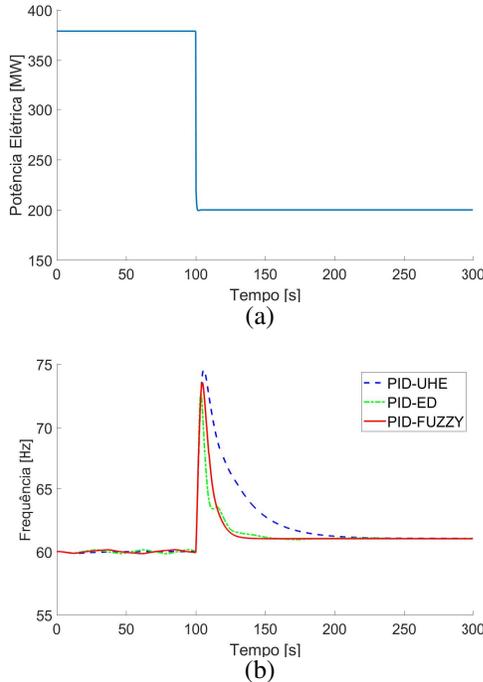


Fig. 15. (a) Representação da perturbação de carga aplicada na UHE (b) Resposta comparativa entre os controladores para desinterligação da UHE com carga remanescente de 50%.

Na Fig. 15 (a), no instante 100 segundos é realizada a desinterligação da UHE do SIN e a carga do sistema ilhado diminui para 50% da potência nominal. Na Fig. 15 (b) observa-se o desvio da frequência para os três controladores utilizados. Percebe-se que a frequência de restabelecimento fica em torno de 61 Hz, que ocorre devido ao estatismo permanente presente nesta malha de controle, levando a frequência de referência para este patamar. Observa-se que todos os controladores conseguem manter a estabilidade do SEP, produzindo resultados satisfatórios para o sistema controlado.

TABELA VIII
DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PARA UMA PERDA DE CARGA DE 45%

Controlador	Pico de frequência	Tempo de acomodação
PID-UHE	74,4 Hz	170 s
PID-ED	73,5 Hz	145 s
PID-FUZZY	73,7 Hz	130 s

Os resultados obtidos com os controladores PID-ED e PID-FUZZY são melhores do que o PID utilizado atualmente na UHE. Já entre eles os resultados estão bem próximos, pois um dos pontos utilizados para a sintonia do PID FUZZY o ponto de 50% de potência, por o controlador PID-FUZZY não oscila e possui um menor tempo de acomodação, assim, conclui-se que este possui um desempenho superior em relação

ao controlador PID-ED. Os índices de desempenho dos controladores podem ser vistos na Tabela VIII. Nesta tabela, o tempo de acomodação é definido na faixa de 2% do valor em regime permanente.

C. Caso II

Na segunda condição de operação analisada, a geração da UHE estava em 95% e após a desinterligação do SIN a carga remanescente é de 75%. Obteve-se, portanto, a curva de perturbação apresentada na Fig. 16 (a), onde no instante 100 segundos, ocorre a diminuição da carga.

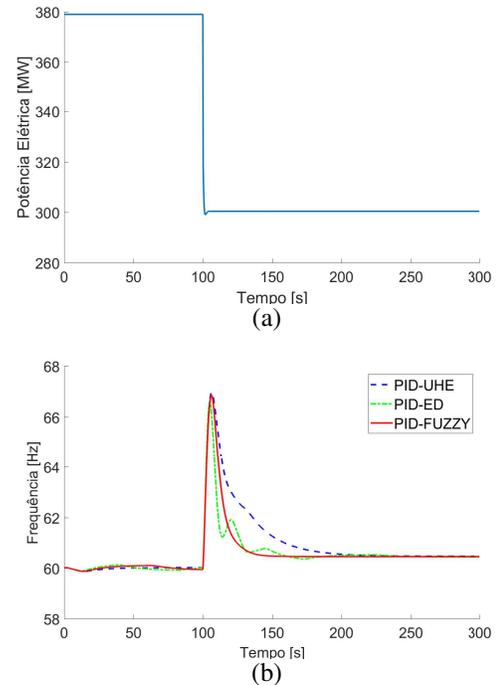


Fig. 16. (a) Representação da perturbação de carga aplicada na UHE (b) Resposta comparativa entre os controladores para desinterligação da UHE com carga remanescente de 75%.

Na Fig. 16 (b), observa-se o desvio da frequência para os três controladores utilizados, verifica-se que todos eles conseguem manter a estabilidade do SEP condio desejada pelo projeto. Através desta figura e da Tabela IX, percebe-se que o sinal da frequência do controlador PID-FUZZY novamente não oscilou e teve um menor tempo de acomodação, justificando então o seu uso.

TABELA IX
DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PARA UMA PERDA DE CARGA DE 20%

Controlador	Pico de frequência	Tempo de acomodação
PID-UHE	67,0 Hz	175 s
PID-ED	66,8 Hz	145 s
PID-FUZZY	66,8 Hz	140 s

D. Caso III

A terceira condição de operação analisada, simula a desinterligação da UHE do SIN, e um aumento da carga.

Inicialmente, a geração da UHE estava em 50% e após a desinterligação do SIN a carga remanescente é de 95%. Na Fig. 17 (a), no instante 100 segundos é realizada a desinterligação da UHE do SIN e a carga aumenta para 95% da potência nominal.

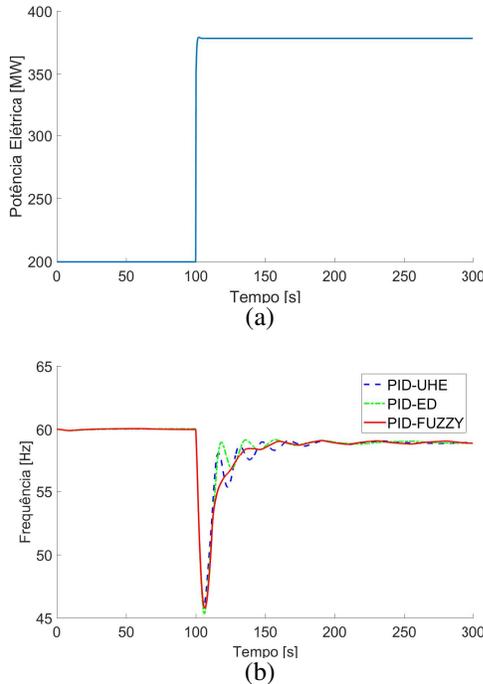


Fig. 17. (a) Representação da perturbação de carga aplicada na UHE (b) Resposta comparativa entre os controladores para desinterligação da UHE com carga remanescente de 95%.

Na Fig. 17 (b) observa-se o desvio da frequência para os três controladores utilizados e que novamente a condio de estabilidade garantida. Percebe-se que a frequência de restabelecimento fica em torno de 58,5 Hz, que ocorre devido ao estatismo permanente presente nesta malha de controle, levando a frequência de referência para este patamar.

TABELA X
DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PARA UM AUMENTO DE CARGA DE 45%

Controlador	Pico de frequência	Tempo de acomodação
PID-UHE	46 Hz	170 s
PID-ED	45,9 Hz	150 s
PID-FUZZY	46,2 Hz	140 s

Através da Fig. 17 (b) e da Tabela X, conclui-se que o controlador PID-FUZZY possui um desempenho superior aos controladores PID convencionais, visto que sua resposta foi mais suave, com um pico de frequência menor e com um tempo de amortecimento também menor.

E. Caso IV

Na quarta condição de operação analisada, a geração da UHE estava em 50% e após a desinterligação do SIN a carga remanescente é de 75%. Obteve-se, portanto, a curva de perturbação apresentada na Fig. 18 (a), onde no instante 100

segundos ocorre a desinterligação da UHE do SIN e a carga aumenta para 75% da potência nominal. Na Fig. 18, observa-se o desvio da frequência para os três controladores utilizados, vñ-se novamente que a condio de estabilidade garantida.

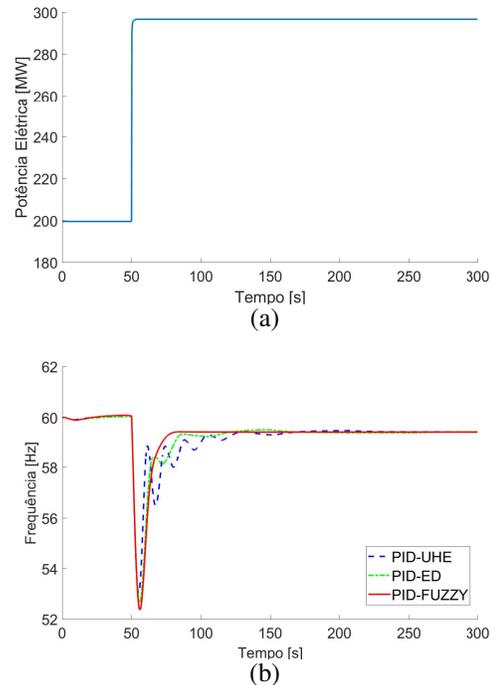


Fig. 18. (a) Representação da perturbação de carga aplicada na UHE (b) Resposta comparativa entre os controladores para desinterligação da UHE com carga remanescente de 75%.

TABELA XI
DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PARA UM AUMENTO DE CARGA DE 25%

Controlador	Pico de frequência	Tempo de acomodação
PID-UHE	52,5 Hz	120 s
PID-ED	52,6 Hz	98 s
PID-FUZZY	52,8 Hz	85 s

Através da Fig. 18 (b) e da Tabela XI, conclui-se que o controlador PID-FUZZY possui um desempenho superior aos controladores PID convencionais, visto que o sinal da frequência não oscilou e acomodou antes que os outros sinais.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, fez-se uso de um controlador PID *fuzzy* para o problema de carga e frequência de um sistema elétrico de potência para propor uma nova forma de definição do universo de discurso do sistema supervisório *fuzzy*. Para fins de validação da técnica proposta, foram realizados testes de simulações com dados de uma usina hidrelétrica do SIN. O controlador proposto foi então comparado com um controlador PID convencional que está em uso na usina hidrelétrica sob estudo e com um controlador PID sintonizado por um algoritmo de evolução diferencial. Quatro situações de ilhamento foram apresentadas. O controlador PID *fuzzy* mostrou um desempenho superior aos controladores PID convencionais

em todos os casos. As respostas do controlador PID *fuzzy* foram mais suaves, menos oscilantes, que para as máquinas significa maior tempo de vida, com um pico de frequência menor e com um tempo de estabilização também menor. Como trabalhos futuros, espera-se desenvolver um controlador PID fracionrio *fuzzy* para o problema de carga e frequência de usinas hidrelétricas, com isso, espera-se aliar as vantagens do controlador PID fracionrio com a técnica de sintonia *fuzzy*.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Machowski, J. Bialek, J. R. Bumby, and J. Bumby, *Power system dynamics and stability*. John Wiley & Sons, 1997.
- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug 2004.
- [3] J. M. A. Castaneda, O. E. T. Breffe *et al.*, "Obtaining of better strategies for the frequency control in the electrical power system of ecuador (first part)," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 6, pp. 2232–2240, 2012.
- [4] G. Zhang, "Frequency-load control based on auto-tuning neurons for ship power station," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 1196 – 1202, 2011, cEIS 2011.
- [5] S. K. Pandey, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 318 – 334, 2013.
- [6] Y. V. Hote and S. Jain, "Pid controller design for load frequency control: Past, present and future challenges," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604–609, 2018.
- [7] P. Pei, Z. Pei, Z. Tang, and H. Gu, "Position tracking control of pmsm based on fuzzy pid-variable structure adaptive control," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, 2018.
- [8] W. He and Y. Dong, "Adaptive fuzzy neural network control for a constrained robot using impedance learning," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1174–1186, 2018.
- [9] E.-C. Chang, R.-C. Wu, Z. Ke, and G.-Y. Chen, "Adaptive neuro-fuzzy inference system-based grey time-varying sliding mode control for power conditioning applications," *Neural Computing and Applications*, vol. 30, no. 3, pp. 699–707, 2018.
- [10] Z. Zhang, Z. Huo, and Z. Xiao, "Pid control with fuzzy compensation for hydroelectric generating unit," in *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, vol. 4, 2002, pp. 2348–2352 vol.4.
- [11] G.-D. Chen, W.-Y. Cai, H.-K. Xu, and M.-H. Huang, "The application of intelligent integral realized by fuzzy logic for hydroturbine governing system," in *Machine Learning and Cybernetics, 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 674–678.
- [12] Y. Xiaoming, W. Chao, W. Junbo, M. Lei, and Z. Lijie, "Simulation research of hydraulic turbine generator under fuzzy pid control with load disturbance and 100 load rejection," in *2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, Aug 2015, pp. 1028–1033.
- [13] "IEEE guide for the application of turbine governing systems for hydroelectric generating units," *IEEE Std 1207-2011 (Revision to IEEE Std 1207-2004)*, pp. 1–131, June 2011.
- [14] E. Donaisky, G. H. Oliveira, E. A. Santos, G. V. Leandro, A. M. Pena, and J. A. Souza, "Semi-physical piecewise affine representation for governors in hydropower system generation," *Electric Power Systems Research*, vol. 136, pp. 181 – 188, 2016.
- [15] P. S. D. P. Committee *et al.*, "Dynamic models for turbine-governors in power system studies," *IEEE Power and Energy Society, Tech. Rep. PES-TR1*, 2013.
- [16] P. Kundur, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994, vol. 7.
- [17] G. A. Munoz-Hernandez, D. I. Jones *et al.*, *Modelling and controlling hydropower plants*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 167–179, Feb 1992.
- [19] A. C. F. Mamede and J. R. Camacho, "Evolutionary algorithms for optimization of 4/4 single phase switched reluctance machine," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 6, pp. 1684–1691, 2018.
- [20] M. G. Bergamini, "Estimação de parâmetros de sistemas não lineares utilizando um sistema colaborativo de metaheurísticas."
- [21] M. Y. Shih and A. C. Enriquez, "Novel coordination of docrs using trigonometric differential evolution algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 5, pp. 1605–1611, 2015.
- [22] J. A. Meda-Campaña, A. Grande-Meza, J. de Jesús Rubio, R. Tapia-Herrera, T. Hernández-Cortés, A. V. Curtidor-López, L. A. Páramo-Carranza, and I. O. Cázares-Ramírez, "Design of stabilizers and observers for a class of multivariable t-s fuzzy models on the basis of new interpolation functions," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 2649–2662, 2018.
- [23] R. M. A. Velasquez and J. V. M. Lara, "Expert system for power transformer diagnosis," in *2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [24] J. de Jesús Rubio, "Sofmls: online self-organizing fuzzy modified least-squares network," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 1296–1309, 2009.
- [25] M. C. Arese, S. L. B. Franca, G. B. A. Lima, and L. Gavião, "Selection of critical process equipment using fuzzy logic," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 8, pp. 1467–1473, 2017.
- [26] M. M. Rocha, J. P. da Silva, and F. d. C. B. de Sena, "Simulation of a fuzzy control applied to a variable speed wind system connected to the electrical network," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, pp. 521–526, 2018.
- [27] M. Pena, J. Gomez, R. Osorio-Comparan, I. Lopez-Juarez, V. Lomas, H. Gomez, and G. Lefranc, "Fuzzy logic for omni directional mobile platform control displacement using fpga and bluetooth," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 6, pp. 1907–1914, 2015.
- [28] R. M. A. Velásquez and J. V. M. Lara, "Principal components analysis and adaptive decision system based on fuzzy logic for power transformer," *Fuzzy Information and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 493–514, 2017.



Cristiano Osinski Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (2014), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná (2017). Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná. Possui experiência na área de Controle de Sistemas, Eletrônica, Sistemas Digitais, Microcontroladores e Sistemas de Potência.



Gideon Villar Leandro Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1989), Ilha Solteira, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1992), Campina Grande e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2000). Atualmente é professor associado I da Universidade Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação e Controle, atuando principalmente nos seguintes temas: identificação de sistemas, sistemas de controle, sistemas a eventos discretos e modelagem matemática.



Gustavo Henrique da Costa Oliveira Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1988), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1992) e Doutorado em Automação pela Universidade Estadual de Campinas e pela Universidade de Nice Sophia Antipolis, França (1997). Foi Professor Titular da Pontifícia Universidade Católica do Paraná durante 1999 a 2009 e, desde 11/2009, é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Atua nas áreas de modelagem, simulação e identificação de sistemas dinâmicos; controle de processos. As aplicações preferências são em processos industriais/petroquímicos e sistemas elétricos de potência (análise de transitórios, transformadores de potência, estabilidade e controle).