

## Comparativo entre os controladores PI Clássico e Fuzzy

### Comparison between Classic PI and Fuzzy controllers

DOI:10.34117/bjdv7n10-324

Recebimento dos originais: 07/09/2021

Aceitação para publicação: 25/10/2021

#### **Douglas Romeu Reif**

Mestrando no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Regional de Blumenau  
Rua Desembargador Guilherme Abry, 253 – Vila Nova - Blumenau/SC – Brasil  
E-mail: douglasreif@gmail.com

#### **Romeu Hausmann**

Doutor em Eletrônica de Potência  
Universidade Regional de Blumenau  
Rua São Paulo, 3250 - Itoupava Seca - Blumenau/SC – Brasil  
E-mail: romeuh@furb.br

#### **Andreza Sartori**

Doutora em Informática  
Universidade Regional de Blumenau  
Rua Antônio da Veiga, 140 – Itoupava Seca - Blumenau/SC – Brasil  
E-mail: asartori@furb.br

#### **RESUMO**

Este artigo traz um exemplo do controle Proporcional e Integral (PI) usado nos conversores estáticos em malha fechada. É apresentado um comparativo entre o controle clássico em relação ao controle digital, usando a lógica difusa. Por simulação foi implementado o filtro de saída típico de um conversor full bridge. Nesta estrutura foram aplicados os dois tipos de controle. A modelagem da estrutura é feita pelo método de espaço de estados. Com o resultado da modelagem encontra-se a função de transferência da planta. O controle PI será aplicado para manter a tensão de saída dentro das especificações do projeto, mesmo que haja alguma alteração da fonte de alimentação na entrada ou na carga conectada na saída. Como resultado são apresentadas as formas de onda da tensão de saída de cada um dos controles, avaliando o quanto cada controle é capaz de estabilizar a tensão de saída. Por fim, é realizado o comparativo identificando qual dos controles obteve o menor sobressinal durante o transitório e qual estabilizou o sinal em regime permanente em menos tempo.

**Palavras-chave:** Conversor, Controlador, Proporcional, Fuzzy, Integral.

#### **ABSTRACT**

This paper brings an example of Proportional and Integral (PI) control used in closed loop static converters. A comparison between classical control versus digital control using fuzzy logic is presented. By simulation the typical output filter of a full bridge converter was implemented. In this structure both types of control have been applied. The modeling of the structure is done by the

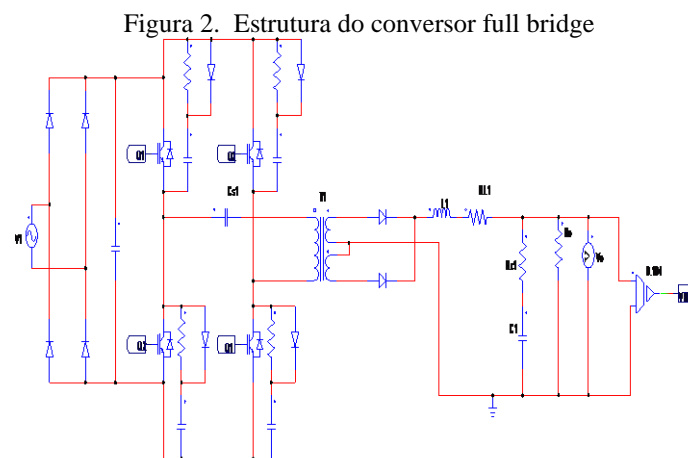
state space method. With the result of the modeling the transfer function of the plant is found. The PI control will be applied to keep the output voltage within the design specifications, even if there is some change in the power supply at the input or in the load connected at the output. As a result, the waveforms of the output voltage for each of the controls are presented, evaluating how well each control is able to stabilize the output voltage. Finally, a comparison is made identifying which of the controls obtained the lowest overshoot during the transient and which stabilized the signal in permanent regime in the shortest time.

**Key-words:** Converter, Controller, Proportional, Fuzzy, Integral.

## 1 INTRODUÇÃO

Os conversores estáticos são equipamentos eletrônicos usados para adaptar diferentes fontes de energia a uma determinada carga. Existem várias topologias que já foram comprovadas como robustas, eficientes e economicamente acessíveis ao consumidor final. Uma topologia que tem sido bastante empregada é o conversor CA-CC (Corrente Alternada – Corrente Contínua).

Este conversor é alimentado por uma tensão em corrente alternada, como exemplo, a tensão da rede em 220V (V1) e na sua saída (Vo) é obtida tensão em corrente contínua de 5V. Este conversor é encontrado em carregadores de bateria de celulares, notebooks, tablets, etc. A estrutura exemplificada é usada para baixas potências < 300W. Para ter maior potência a topologia da Figura 1 é melhor empregada para potências maiores. (MARTINS; BARBI, 2011)

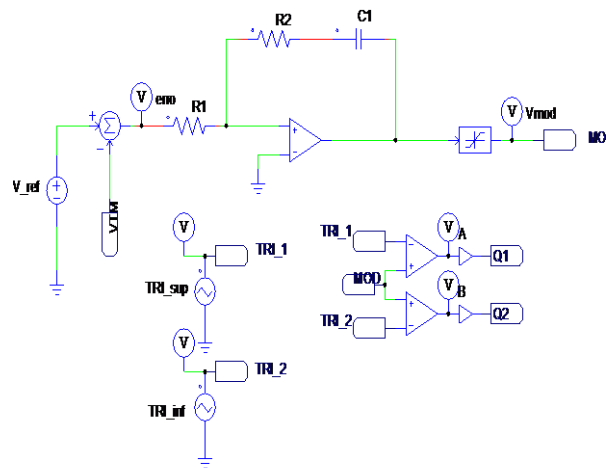


Fonte: Do autor

A modelagem desta estrutura será a base para fazer a comparação entre o controle clássico e o controle digital usando a lógica difusa.

No controle clássico os parâmetros do controlador PI são ajustados por resistores e capacitores e implementados por amplificadores operacionais. A Figura 2 apresenta o circuito típico de um controle de malha fechada usando o controlador PI para ajustar a razão cíclica da chave.

Figura 2. Circuito típico do controlador PI clássico

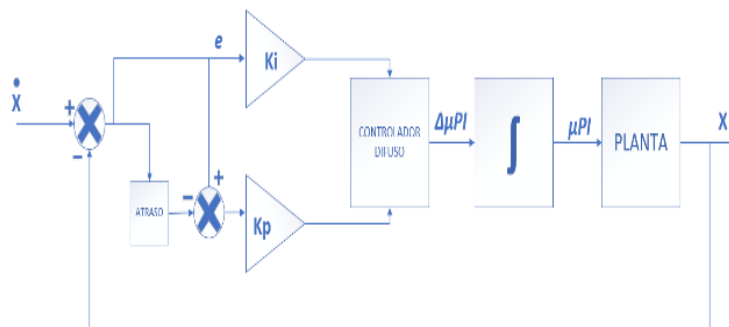


Fonte: Do autor

Como é visto na Figura 2, uma vez implementado o projeto do controlador PI clássico, este não pode ser alterado. Isso acontece porque os elementos são físicos. Para alterar o ganho do controlador é preciso trocar um resistor. Se for necessário ajustar o tempo de acomodação do controle, o capacitor precisa ser trocado. Já na implementação com sinais digitais, os parâmetros serão ajustados pelo algoritmo da lógica difusa, dando ao sistema uma gama de possibilidades de ajustes dos parâmetros do controlador PI.

Essa variedade de valores é ideal para o uso em plantas não lineares, no caso da estrutura do conversor full bridge, que as suas não linearidades estão intrínsecas aos elementos passivos como o indutor e o capacitor. A Figura 3 exibe o diagrama de blocos de um controle usando controlador PI difuso.

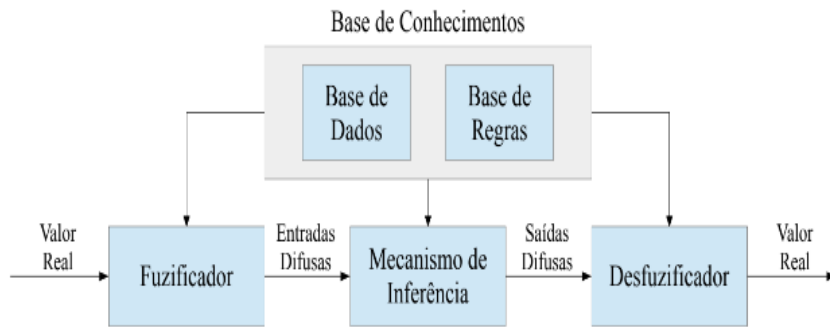
Figura 3. Diagrama de blocos do controlador PI difuso



Fonte: Adaptado (ALMAZAN-ARVIZU et al., 2019)

O bloco do controlador difuso apresentado na Figura 3 tem sua estrutura formada por quatro elementos conceituais (SEBASTIÃO, 2015). A Figura 4 apresenta os elementos da estrutura do controlador difuso.

Figura. 4. Estrutura do controlador difuso



Fonte: Adaptado (SEBASTIÃO, 2015)

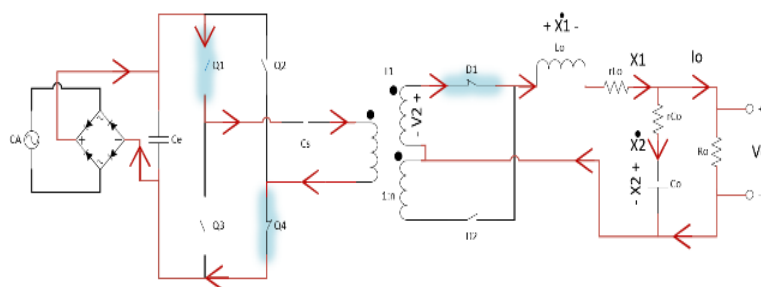
Tal estrutura é uma forma básica de mostrar os elementos, já que cada um pode ter suas características definidas pelo tipo de método a ser utilizado. A exemplo dos mecanismos de inferência que podem ser do tipo Mamdani e Takagi-Sugeno-Kang (TSK). O método escolhido foi o Mamdani, mesmo que este método possa utilizar mais processamento computacional (SANTOS, 2019).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O primeiro passo para modelar a planta é escolher um método de modelagem.

Neste artigo utilizou-se o método por espaço de estados. Com base da estrutura da Figura 1 a primeira etapa de operação é quando os elementos ativos Q1, Q4 e D1 estão em condução. O circuito que representa essa etapa é mostrado na Figura 5.

Figura 5. Primeira etapa de operação



Fonte: Do autor

Aplicando a lei de Kirchoff das tensões no filtro de saída tem-se a seguinte expressão:

$$-V_2 + \dot{x}_1 L_o + rL_o x_1 + R_o(x_1 + C_o \dot{x}_2) = 0 \quad (1)$$

Isolando o termo  $\dot{x}_1$  na equação 1 a expressão fica:

$$\dot{x}_1 = -\frac{(rL_o + R_o)}{L_o} x_1 + \frac{R_o C_o}{L_o} \dot{x}_2 + \frac{V_2}{L_o} \quad (2)$$

Como na equação 2 tem um termo dependente da variável de estado  $\dot{x}_2$  é feito uma nova malha com intuito de isolar essa variável e substituir a expressão resultante na equação 2.

$$-x_2 - rC_o \dot{x}_2 - R_o(x_1 + C_o \dot{x}_2) = 0 \quad (3)$$

Isolando o termo  $\dot{x}_2$  na equação 3, tem-se:

$$\dot{x}_2 = \frac{R_o}{(R_o + rC_o)C_o} x_1 - \frac{1}{(R_o + rC_o)C_o} x_2 \quad (4)$$

Substituindo a equação 4 na equação 2 a fim de ter apenas o termo  $\dot{x}_1$  isolado, tem-se:

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_o(rL_o + rC_o) + rL_o rC_o}{L_o(R_o + rC_o)} x_1 - \frac{R_o}{L_o(R_o + rC_o)} x_2 + \frac{V_2}{L_o} \quad (5)$$

Com as equações 4 e 5 em função das variáveis de estado, a matriz de espaço de estados fica:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_o(rL_o + rC_o) + rL_o rC_o}{L_o(R_o + rC_o)} & -\frac{R_o}{L_o(R_o + rC_o)} \\ \frac{R_o}{(R_o + rC_o)C_o} & -\frac{1}{(R_o + rC_o)C_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_o} \\ 0 \end{bmatrix} V_2 \quad (6)$$

Na segunda etapa de operação todas as chaves estão desligadas e os diodos D1/D2 funcionam como diodos em roda livre, deste modo, a expressão da tensão de saída é a mesma para as duas etapas de operação.

$$V_o = R_o(x_1 - C_o \dot{x}_2) \quad (7)$$

Substituindo a equação 4 na equação 7, tem-se:

$$C = C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} \frac{R_o r C_o}{R_o + r C_o} & \frac{R_o}{R_o + r C_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A expressão geral para montar a função de transferência é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(s) \\ \dot{x}_2(s) \end{bmatrix} = (sI - A)^{-1} B u d(s) \quad (9)$$

Substituindo os valores na equação 9 a matriz fica:

$$\begin{bmatrix} i_L(s) \\ \dot{v}_o(s) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{R_o(rL_o + rC_o) + rL_o r C_o}{L_o(R_o + rC_o)} & -\frac{R_o}{L_o(R_o + rC_o)} \\ \frac{R_o}{(R_o + rC_o)C_o} & -\frac{1}{(R_o + rC_o)C_o} \end{bmatrix} \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ L_o \end{bmatrix} V_2 d(s) \quad (10)$$

Resolvendo a equação 10 e multiplicando a linha inferior a fim de isolar  $\dot{v}_o(s)/d(s)$  encontra-se a função de transferência da planta, que é a razão entre tensão de saída pela razão cíclica.

$$\frac{\dot{v}_o(s)}{d(s)} = V_2 \frac{\left(\frac{1}{C_o R_o} + s\right)}{s^2 + s\left(\frac{1}{C_o R_o} + \frac{rL_o}{L_o}\right) + \frac{1}{C_o L_o} \left(\frac{R_o + rL_o}{R_o}\right)} \quad (10)$$

O projeto do controlador PI pode ser feito usando alguns dos seguintes métodos: resposta em frequência, lugar das raízes, espaço de estados, e outros (LAZZARIN; BARCELOS, 2019). Para este artigo, foi escolhido o método por resposta em frequência. O bloco de controle é expressado pela equação 11.

$$C_{pi\_clássico} = \left(\frac{k_p s + k_i}{s}\right) \quad (11)$$

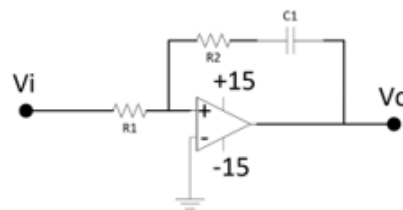
O controlador deve ser projetado de modo a compensar o valor da função de transferência da planta, minimizando o erro (LAZZARIN; BARCELOS, 2019). Os valores de  $k_p$  e  $k_i$  podem ser conseguidos a partir das equações 12 e 13.

$$k_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (12)$$

$$k_i = \frac{1}{C_1 R_1} \quad (13)$$

Essas expressões são válidas para implementação usando amplificadores operacionais, como visualizado na Figura 6.

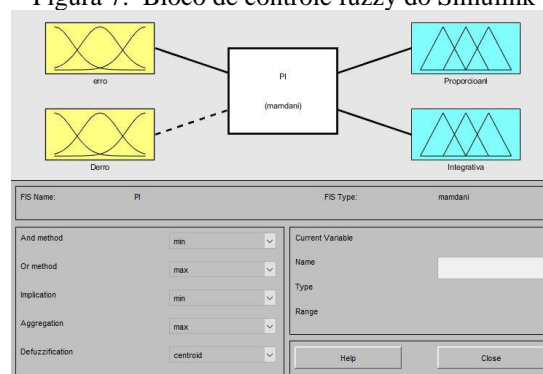
Figura 6. Controlador PI usando amplificador operacional



Fonte: Do autor

O projeto do controlador difuso será baseado no bloco fuzzy logic controller do Matlab. Este bloco é encontrado na biblioteca de elementos no Simulink. O circuito de simulação é montado em blocos no Simulink que permite uma visualização em tempo real dos sinais (PIRES, 2012). As funções do bloco fuzzy são mostradas na Figura 7.

Figura 7. Bloco de controle fuzzy do Simulink



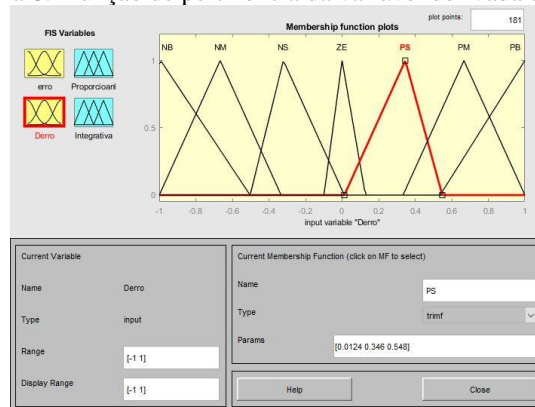
Fonte: Do autor

De acordo com a Figura 7 o bloco tem duas entradas e duas saídas, as entradas são o erro e a derivada do erro, e as saídas são os blocos Proporcional e o Integral.

Todas as variáveis devem ser configuradas dentro de uma função de pertinência, que vai gerar uma gama de valores entre -1 e 1, diferente da lógica binária que só é representada por 0 ou 1. As regras do controle difusas são declarativas e as funções de pertinência vão definir se tal conjunto de números pertence ou não ao conjunto.

No caso dos conversores o interesse é sempre zerar o erro, desta forma, a função de pertinência pode ser separada em pequenos, médios e grandes valores. Cada uma separada por suas regras de grau de pertinência. A Figura 8 traz a função de pertinência com os graus definidos.

Figura 8. Função de pertinência da variável derivada do erro



Fonte: Do autor

As variáveis de entrada e saída são configuradas de acordo com função de pertinência do projeto proposto. Esta configuração depende da experiência do engenheiro especialista ou de um banco de dados.

Para interligar as variáveis de erro e derivada do erro das saídas Proporcional e Integral, utilizou-se os dados tabelados com as funções pertinência de acordo com estado do sistema (PIRES, 2012). A Figura 9 mostra as regras para a variável KP(Proporcional) e a Figura 10 para a variável KI (Integral).

Figura 9. Regras difusas para variável de saída KP1(Proporcional)

KP		<i>Derivada do Erro</i>						
		<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>Erro</i>	<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
	<i>NM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>
	<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>
	<i>ZE</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>
	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>

Fonte: (PIRES, 2012)

Sendo o significado das siglas: Positiva grande (PB), Positiva Média (PM), Positiva Baixa (PS), Zero (ZE), Negativa Grande (NB), Negativa Média (NM) e Negativa Pequena (NS). Gerando sete regras de pertinência.



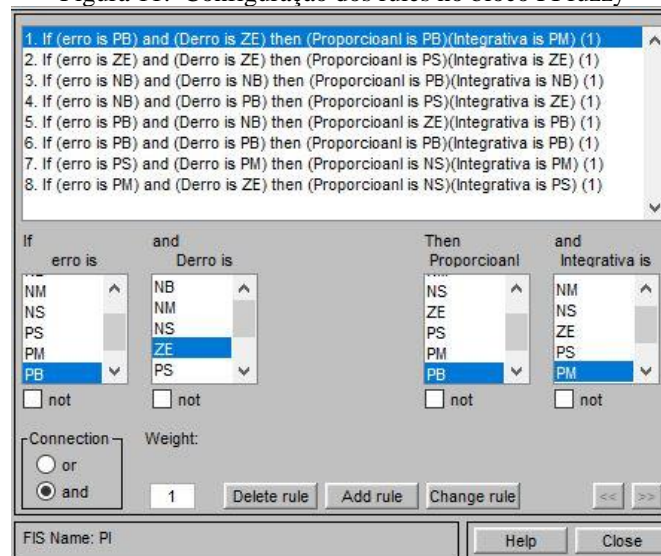
Figura 10. Regras difusas para variável de saída KI(Integral)

KI		Derivada do Erro						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Erro	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
	NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
	PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

Fonte: (PIRES, 2012)

Com as regras estabelecidas na Figura 9 e Figura 10, aplicou-se as regras das tarefas nos rules do bloco fuzzy como exemplificado na Figura 11.

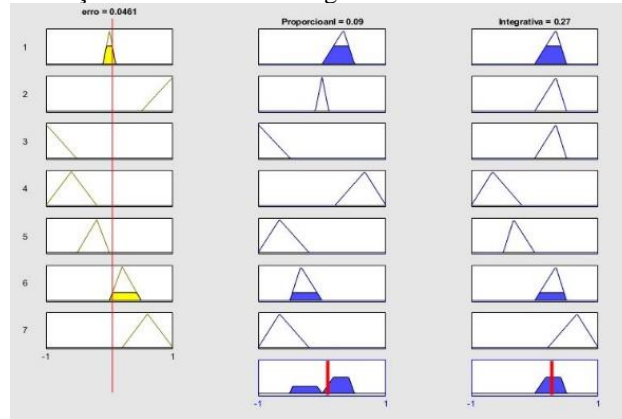
Figura 11. Configuração dos rules no bloco PI fuzzy



Fonte: Do autor

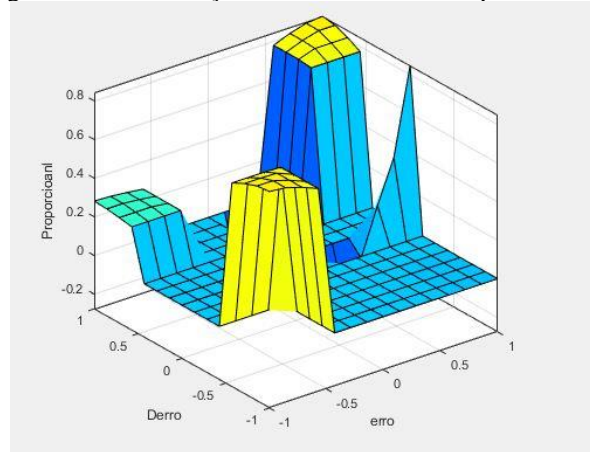
Após feita a configuração dos rules é possível visualizar as variáveis de algumas formas: todas as variáveis em um gráfico mostrando suas formas de pertinência, em superfícies 3D e ou em gráfico 2D. As Figuras 12, 13, 14 mostram os exemplos de cada uma das opções de visualização.

Figura 12. Visualização dos rules no modo gráfico com as variáveis e suas pertinências



Fonte: Do autor

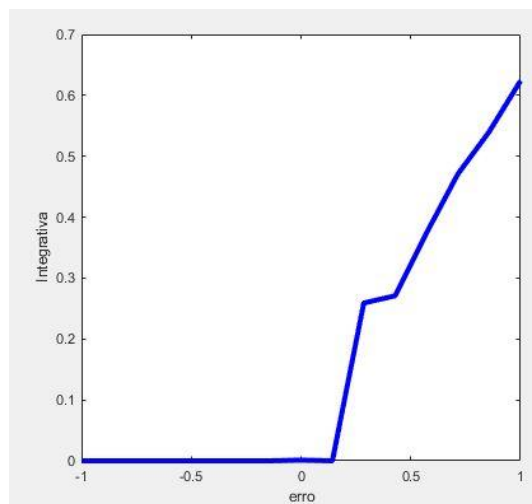
Figura 13. Visualização dos rules no modo superfície 3D



Fonte: Do autor

Neste exemplo (Figura 13), a variável de entrada proporcional e relação às variáveis de saídas erro e a derivada do erro.

Figura 14. Visualização dos rules no modo gráfico 2D com a variável de entrada “erro” em relação à variável de saída Integral



Fonte: Do autor

No instante que a simulação estiver sendo computada, o modelo de visualização da Figura 12 é aberto pelo Simulink, e é possível visualizar a alteração das funções de pertinência.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados do conversor full bridge estão relacionados na Tabela 1.

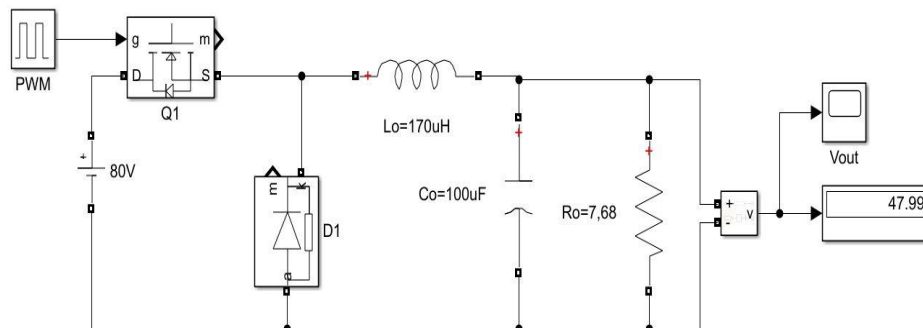
Tabela 1. Dados do conversor

Parâmetro	Valor	Grandeza
Tensão de entrada	220	Vca
Tensão de saída	48	Vcc
Potência de saída	300	W
$\Delta iL$	15% de $I_o$	V
$\Delta v_c$	5% de $V_o$	V
Frequência de chaveamento	120000	Hz
$L_o$	170	$\mu H$
$C_o$	100	$\mu F$
$R_o$	7,68	$\Omega$

Fonte: Do autor

A função de transferência que representa a planta foi modelada na equação 10. A montagem dos blocos no Simulink é mostrada na Figura 15. O conversor full bridge foi reduzido a um conversor Buck na simulação para facilitar a análise dos dados.

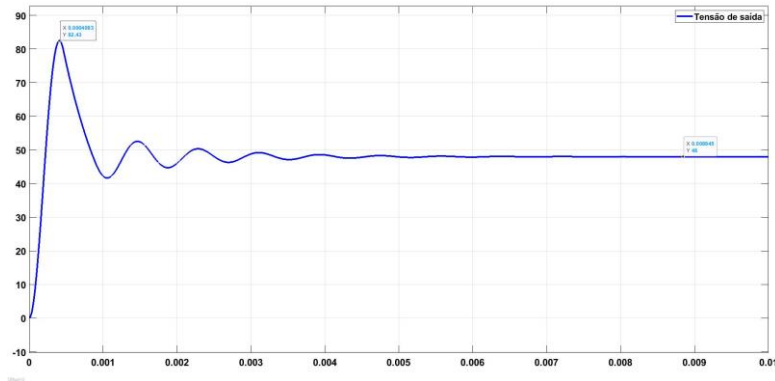
Figura 15. Conversor Buck com os parâmetros do filtro de saída do conversor full bridge.



Fonte: Do autor

O primeiro passo foi testar o circuito em malha aberta para validar a estrutura proposta na Figura 15, o resultado é a tensão de saída em malha aberta é mostrada na Figura 16.

Figura 16. Tensão de saída em malha aberta

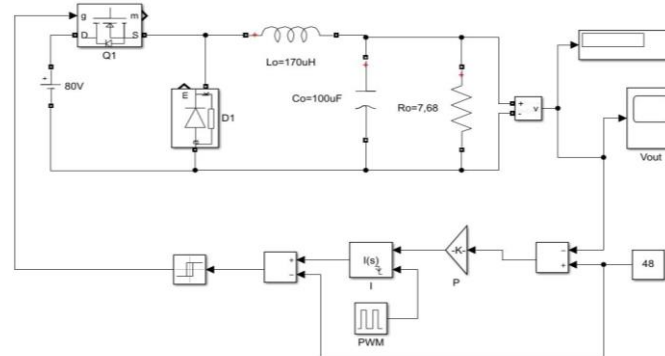


Fonte: Do autor

De acordo com a Figura 16 a tensão de saída estabilizou em 48V em aproximadamente 6ms, mas em 0,4ms teve uma sobretensão de 82,43V.

O segundo passo foi especificar o controlador PI para conexão em malha fechada. A estrutura do controlador PI clássico é mostrada na Figura 17.

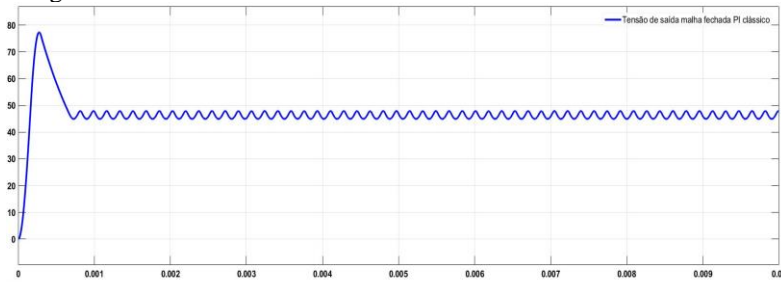
Fig. 17. Estrutura com o controle PI clássico



Fonte: Do autor

O resultado do controle é mostrado na Figura 18. A tensão de saída estabilizou em 48V em aproximadamente 1ms e a sobretensão ficou em 76,35V em 0.2ms. O resultado é melhor do que em malha aberta, contudo, o sinal ficou com uma oscilação 2,4V no limite da especificação do projeto.

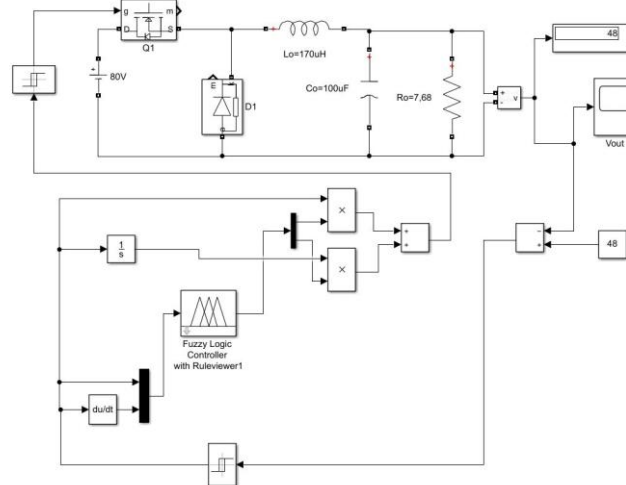
Fig. 18. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI clássico



Fonte: Do autor

Como terceiro passo, criar a estrutura com o bloco PI fuzzy. Um detalhe importante é realizar o vínculo entre o bloco configurado no editor no Matlab com o bloco de controle no Simulink. Para isso basta criar uma nova workspace e exportar do bloco para o Simulink. A estrutura montada é exposta na Figura 19.

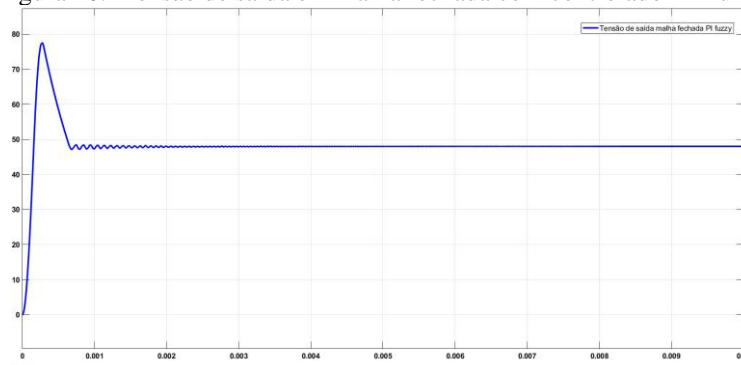
Figura 19. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI fuzzy



Fonte: Do autor

O resultado do teste na estrutura exibida na Figura 19, é mostrado na Figura 20 com a tensão de saída em malha fechada usando o controlador PI fuzzy.

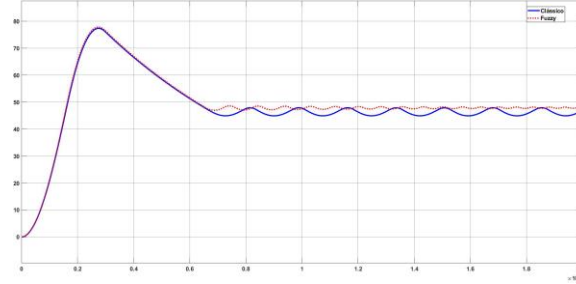
Figura 20. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI fuzzy



Fonte: Do autor

A tensão de saída obteve um valor de sobretensão de 77,87V em 0.2ms, ficando 1,52V acima da tensão no controle PI clássico, entretanto, em regime permanente o controlador PI fuzzy eliminou a oscilação na forma de onda da tensão de saída estabilizando em 48V. Essa afirmação é visível na Figura 21 que faz o comparativo das duas formas de onda.

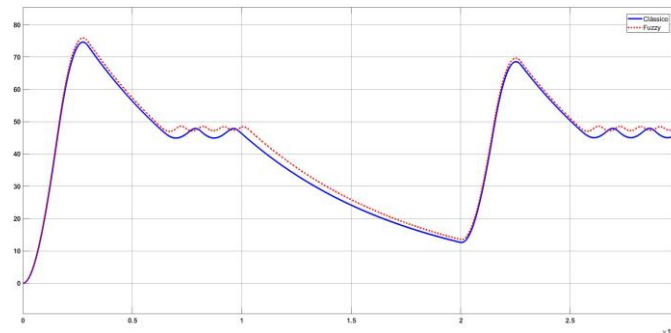
Figura 21. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI fuzzy e clássico



Fonte: Do autor

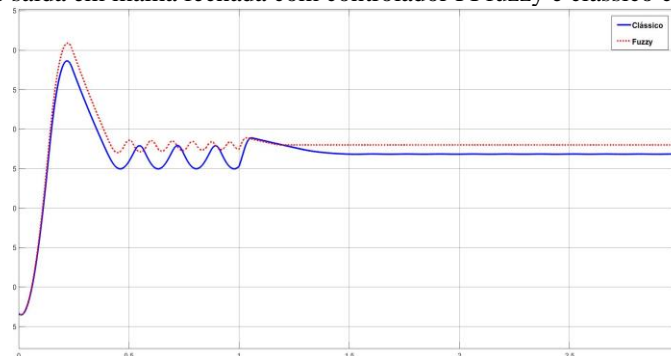
Para mostrar a robustez do controlador PI fuzzy foram feitas mais duas simulações comparativas. Na Figura 22 a tensão de entrada foi desligada por 1ms e depois ligada novamente. Na Figura 23 a carga nominal foi desligada em 1ms e depois uma nova carga de  $77\Omega$ , dez vezes maior que a carga nominal conectada.

Figura 22. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI fuzzy e clássico com a alteração da fonte de alimentação



Fonte: Do autor

Figura 23. Tensão de saída em malha fechada com controlador PI fuzzy e clássico com a alteração na carga



Fonte: Do autor

Na Figura 22 ambos os controles tiveram uma boa retomada em estabilizar a carga, por outro lado, na Figura 23 o controlador PI clássico não conseguiu estabilizar a tensão de saída em 48V. Ficou em regime permanente com 46,85V, no entanto, o controlador PI fuzzy mostrou uma boa performance em estabilizar a tensão de saída de acordo com as especificações iniciais.

#### **4 CONCLUSÃO**

Ambos controladores têm uma boa performance em controlar a tensão de saída. As principais vantagens demonstradas nas simulações pelo controlador PI fuzzy, foram a não necessidade de especificar os valores de ganho proporcional e integral na estrutura. Assim, o projeto não precisa ser alterado para ajustar estes parâmetros.

Este ajuste é feito de forma inteligente pelo controlador. Outra vantagem é o fato de que em uma implementação prática os parâmetros do controlador PI fuzzy não sofrem interferências do meio ambiente. Já no controlador PI clássico as diferenças de temperatura alteram os valores dos elementos passivos, podendo até deixar o controlar instável ou fora de sintonia.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Regional de Blumenau e à Secretaria de Estado da Educação de Santa Catarina pelas bolsas de estudo e aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica pela excelência em suas aulas.

## REFERÊNCIAS

ALMAZAN-ARVIZU, Ricardo Yahir et al. Control PI difuso de un sistema de levitación magnética mediante un sistema embebido. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, v. 20, n. 4, p. 1–11, 1 out. 2019.

LAZZARIN, Telles Brunelli; BARCELOS, Renan Pillon. Retificadores PWM monofásicos para correção do fator de potência. 1<sup>o</sup> edição ed. Florianópolis: [s.n.], 2019.

MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores. 3.Ed.rev ed. Florianópolis: [s.n.], 2011. Disponível em: <[https://www.amazon.com.br/Eletrônica-potência-introdução-estudo-conversores/dp/8590520315/ref=sr\\_1\\_4?\\_\\_mk\\_pt\\_BR=ÂMĂŽÕÑ&dchild=1&keywords=introdução+ao+estudo+dos+conversores&qid=1604788052&sr=8-4](https://www.amazon.com.br/Eletrônica-potência-introdução-estudo-conversores/dp/8590520315/ref=sr_1_4?__mk_pt_BR=ÂMĂŽÕÑ&dchild=1&keywords=introdução+ao+estudo+dos+conversores&qid=1604788052&sr=8-4)>. Acesso em: 7 nov. 2020.

PIRES, Nuno Filipe Lopes Agualusa. Sintonia de Controladores Baseada em sistemas de inferência difusa. 2012. 110 f. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.

SANTOS, Bruno Feldens Dos. Técnicas de Sintonia de Controlador Difuso Aplicado ao Controle de Processos. 2019. 77 f. Universidade Federal de Sergipe, 2019. Disponível em: <<http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12318>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

SEBASTIÃO, Ana Margarida Varela. Sintonização de controladores difusos através de técnicas de otimização não-linear com restrições. 2015. 76 f. Universidade Nova de Lisboa, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/15626>>. Acesso em: 30 nov. 2020.