

# CONCEPÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CONTROLADOR BASEADO EM LÓGICA DIFUSA, PARA GARANTIR PERPENDICULARIDADE AO SOL, ANALIZANDO OS PONTOS CRÍTICOS NO SINAL DE CONTROLE

**Victor Andrés Patiño Mantilla** – victor\_pama@hotmail.com

Universidade Federal de Itajubá, Pós-Graduação em Engenharia de Energia

**Oswaldo José Venturini** – osvaldo@unifei.edu.br

**José Carlos Escobar Palacio** – jocesobar@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** A demanda mundial de energia é crescente, causada principalmente pelo aumento exponencial da população do planeta. O uso de energia solar por meio das tecnologias fotovoltaica e heliotérmica também cresce. Para médias e altas temperaturas, no caso da tecnologia heliotérmica, é indispensável o uso de sistemas de controle que garantam o rastreamento e posicionamento perpendicular ao sol. Isto é comumente realizado mediante modelagem, obtendo os ângulos que relacionam a perpendicularidade do sol com o sistema de captação. Estudos comprovam que o uso do rastreamento solar aumenta a eficiência de entrega de energia entre 15% e 40%. Diversas técnicas podem ser empregadas para o rastreamento solar, sendo que uma delas está baseada na utilização de controladores que usam a lógica difusa. Estas estratégias de controle permitem analisar processos complexos e tomar decisões que garantam uma resposta mais precisa. Assim, apresenta-se neste trabalho a configuração de um controlador baseado em lógica difusa, desenvolvido na ferramenta Labview versão 11.00. Para garantir o posicionamento perpendicular ao sol, o controlador foi criado corrigindo a função de saída, sendo comparada com o erro, reduzindo o “maximum overshoot ( $M_p$ )” e o “setting time ( $T_s$ )” e assim obtendo o seguimento do “MPPT” da energia gerada pelos sistemas solares. Empregou-se ainda a metodologia conhecida como análise dos pontos críticos.

**Palavras-chave:** Rastreamento solar, Logica Difusa, Ponto Críticos.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar é a forma de energia primária disponível em maior quantidade em nosso planeta, sendo também uma da forma de energia mais disponível e descontínua em seu uso. A energia heliotérmica é gerada da conversão de irradiação solar em calor, onde as temperaturas podem alcançar valores bastante elevados (acima de 1000 °C), o qual em seguida, através de um ciclo de potência, é convertido em energia elétrica. De acordo com o Global Status Report (REN21, 2015), a geração de energia heliotérmica no ano de 2014 no mundo foi de 4,4 GW, tendo um aumento de 27% da quantidade gerada no ano anterior de 3,4GW em usinas elétricas com tecnologia “Concentrating Solar Power” (CSP). A energia heliotérmica pode ser captada a partir de várias tecnologias: cilindro parabólico, torre central, disco parabólico e refletores lineares de Fresnel. Os três primeiros sistemas estão compostos de coletor, receptor, armazenamento, transporte e, por último, um conversor (ciclo) de potência (Cami, 2011). O aumento da eficiência dos sistemas heliotérmicos se baseia na análise e otimização de quatro fatores: coleta da irradiação solar, conversão em calor, transporte e armazenamento do calor e conversão final em eletricidade. Na coleta da irradiação encontra-se a mais importante etapa para o aproveitamento final de energia, assim torna-se necessário para estes sistemas realizar o seguimento do sol, e posicionar o equipamento sempre perpendicular a ele. Nos sistemas que usam coletores cilíndricos parabólicos o rastreamento será realizado em um único eixo, que pode ter alinhamento norte-sul ou leste-oeste. Para os sistemas de disco parabólico o rastreamento é realizado em os dois eixos, sendo possível obter o posicionamento nos ângulos azimute-elevação.

Os sistemas de seguimento podem ser classificados dependendo do tipo de controle em: passivos, micro processados ou eletro-ópticos. Estes últimos utilizam foto sensores para detectar a posição do sol. Nesses sistemas, as informações obtidas pelos sensores são enviadas ao circuito de controle, responsável pelo acionamento do motor, que alinha a estrutura de fixação de forma que os coletores fiquem voltados em direção aos raios solares. (Romulo e Lira, 2014).

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

A partir do software Labview foi desenvolvido um controlador baseado em lógica difusa que realiza o rastreamento do sol do norte-sul e do leste-oeste. Estes movimentos vão ser interpretados na faixa dos 180°, sendo utilizadas estratégias de controle inteligente que conseguem diminuir os *overshoots* que estão presentes num sinal da saída de um processo. Com o objetivo de atingir o ponto de máxima potência na curva I-V, foram utilizadas células fotovoltaicas de

baixa potência como sensores para realizar as comparações da posição do sol. Os dados lidos em tempo real do sol eram utilizados como entradas no controlador que mandava sinais na saída, que eram interpretados como ângulos de posição para os motores. Assim, garantia-se a o posicionamento perpendicular com ao sol.

### 2.1 Metodologia da lógica difusa

O conceito de lógica difusa (LD) está associado ao relativo que se percebe no ambiente. Por exemplo, ideias relacionadas à altura de uma pessoa, velocidade na qual um objeto se move, ou a temperatura num espaço. (Baba, 2014). A LD é ambigualmente formulada e depende de quem vê o efeito físico ou químico, para se formar o conceito de como será interpretada a situação. Uma pessoa pode ser alta ou baixa, algo pode se mover rápido ou lento, a temperatura pode ser baixa ou moderada ou alta. Essas afirmações sobre uma variável são ambíguas porque rápido, baixo, alto são afirmações do observador, e podem variar de um observador para outro. O ser humano pode-se perguntar quando algo é quente ou frio, quão baixo é a temperatura quando esta fria, ou quão alta quando se diz quente (Nadu, 2014).

Essas ambiguidades são uma extensão da teoria clássica dos conjuntos, onde um elemento pertence a um conjunto ou não. A finalidade dos conjuntos difusos é modelar a ambiguidade com que uma variável é percebida. Os conjuntos difusos são base para a lógica difusa, do mesmo jeito que a teoria clássica de conjuntos é a base para a lógica booleana (Cisneros e Vernon, 2005). Com os conjuntos difusos são feitas declarações do tipo “IF-THEN” definindo-se estes com LD. Este tema é próprio da inteligência artificial, que tenta imitar o pensamento humano. O campo deste estudo é o controle industrial, onde o mais importante é a experiência ou a base do conhecimento do operador, isso será útil para emular o comportamento humano com uma máquina, embora seja muito limitada (Sharaf,2008), (Sheng e Peng, 2015). Na Fig. 1 mostra-se o esquema do funcionamento do controle com lógica difusa. A lógica do processo de seguimento solar foi estabelecida seguindo a intensidade da radiação do sol, sendo que a qualidade e quantidade de energia segundo a posição do sol foi importante na conceição do controlador.

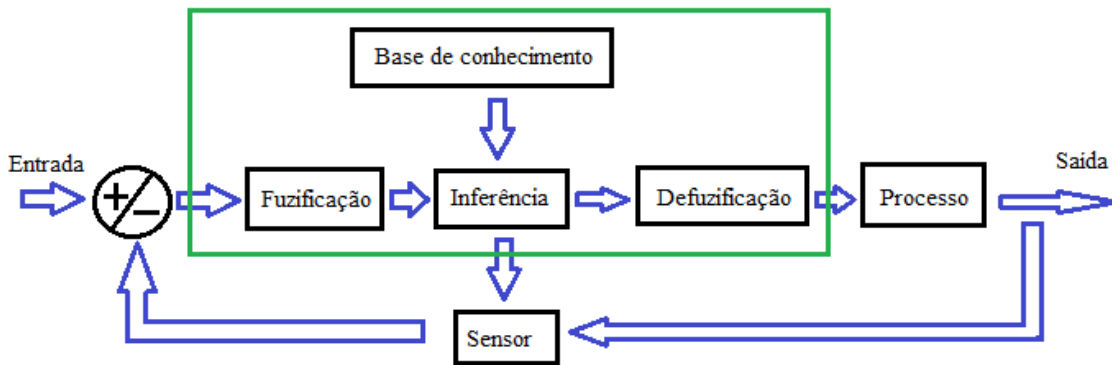


Figura 1. Esquema da Logica difusa.

### 2.2 Pontos críticos

Ao conceber um controlador baseado em LD, é importante dispor de um método para a comparação das funções e a inicialização das regras. Os pontos críticos num sinal representam os valores mais significativos na curva característica antes de se estabilizar o sinal com o valor desejado. O objetivo é contrariar o efeito dos “overshoots” obtidos no sinal de saída e definir as regras para a obtenção de um sinal estável, que atinge o seu ponto de referência “set-point”. Na Fig. 2, é mostrado o comportamento de um sinal num processo que precisa de controle, até atingir o seu ponto de referência.

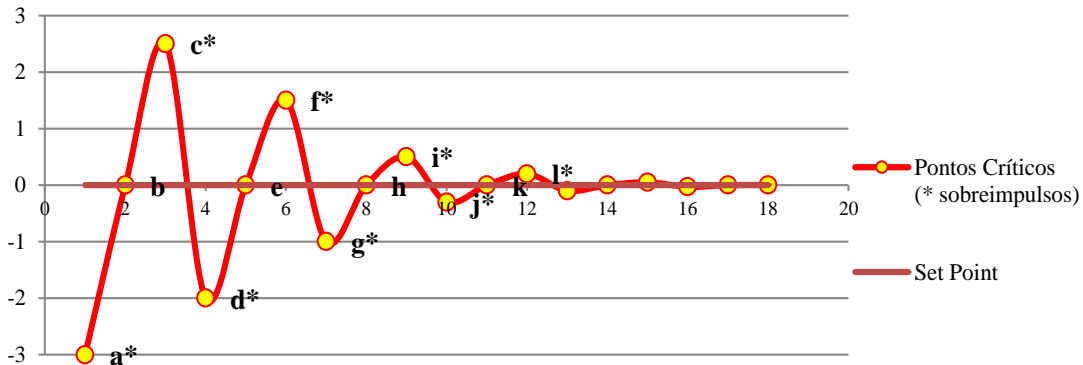


Figura 2. Sinal da onda, com os pontos críticos.

### 3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Um dos principais objetivos dos sistemas que convertem a energia solar em outra forma de energia, é aproveitar ao máximo possível à energia que atinge área específica, sendo importante para estes equipamentos estar sempre posicionado perpendicularmente ao sol. É assim que se tem desenvolvido pesquisas ao redor do mundo com técnicas para atingir tal objetivo, sendo uma delas o controle inteligente.

Neste documento se apresenta o controlador desenvolvido partindo da logica difusa, sendo analisado o sistema para as condições de movimento de acordo ao comportamento da trajetória do sol. Foi criado para seguir a trajetória do norte ao sul e do leste para oeste. Assim é definido o sistema como se mostra na Fig. 3.

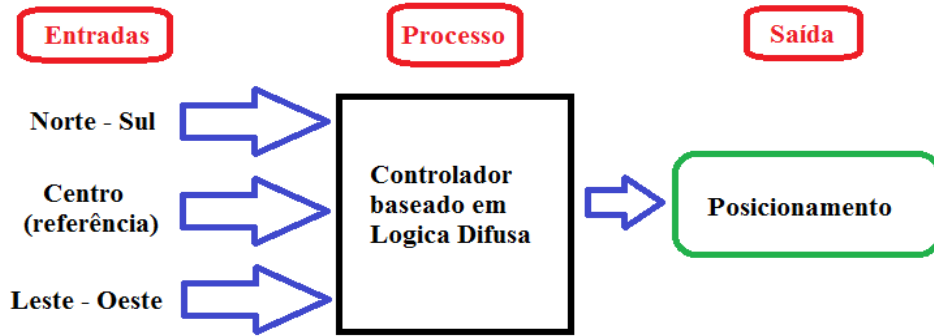


Figura 3. Definição do comportamento do sistema.

Partindo disto foi proposta a matriz de regras associadas ao processo em questão, sendo definida com três entradas e uma saída como se vê na figura.

A base de regras foi estabelecida com o seguinte padrão, sendo o programador quem define o comportamento que vão ter as entradas e saída do processo. O controle do processo foi definido por dois controladores, um deles faz comparações da posição do sol de norte para o sul, e o outro compara do leste para oeste, sendo que os resultados deles entram integrados de volta para o circuito de controle, para obter a posição final do sistema.

A seguir na Tab. 1 e Tab. 2 são exibidas a base de regras geradas que definem o comportamento do controlador.

Tabela 1. Matriz de regras do comportamento da trajetória do sol de norte-sul.

Sul							
Início							
Processo	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
Fim							
Norte							
NG	Z Z Z	B B B	MB B B	MB MB B	MMB MB MB	MMB MMB MMB	MMB MMB MMB
NM	A A MA	Z Z Z	B B B	MB B MB	MMB MB MB	MMB MMB MB	MMB MMB MB
NP	A MA MA	A A MA	Z Z Z	B B B	MB B B	MMB MB B	MMB MB B
Z	A MA MMA	A MA MMA	A A A	Z Z Z	B B B	MMB MB B	MMB MB B
PP	MA MA MMA	A MA MMA	A A MA	A A A	Z Z Z	MMB B B	MB B B
PM	MA MMA MMA	MA MMA MMA	MA MA MMA	MA A MA	A A A	Z Z Z	B B B
PG	MMA MMA MMA	MA MMA MMA	MA MA MMA	MA A MA	A A MA	A A A	Z Z Z

Tabela 2. Matriz de regras do comportamento da trajetória do sol de leste-oeste.

Este							
Início							
Processo	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
Fim							
Oeste							
NG	Z Z Z	B B B	MB B B	MB MB B	MMB MB MB	MMB MMB MMB	MMB MMB MMB
NM	A A MA	Z Z Z	B B B	MB B MB	MMB MB MB	MMB MMB MB	MMB MMB MB
NP	A MA MA	A A MA	Z Z Z	B B B	MB B B	MMB MB B	MMB MB B
Z	A MA MMA	A MA MMA	A A A	Z Z Z	B B B	MMB MB B	MMB MB B
PP	MA MA MMA	A MA MMA	A A MA	A A A	Z Z Z	MMB B B	MB B B
PM	MA MMA MMA	MA MMA MMA	MA MA MMA	MA A MA	A A A	Z Z Z	B B B
PG	MMA MMA MMA	MA MMA MMA	MA MA MMA	MA A MA	A A MA	A A A	Z Z Z

Para definir as funções de pertinência, são estabelecidas as variáveis de entrada. Assim são obtidos 12 pontos críticos na curva característica no sinal de saída, e são nestes pontos onde ocorrem os maiores overshoots.

Na Tab. 3 observam-se as funções de pertinência, os pontos críticos e a ação de controle que serão inseridos no corpo do controlador.

Tabela 3. Regras e ponto do sinal onde se observam os overshoots.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Norte</b>	PG	PM	PP	Z	Z	Z	NG	NM	NP	Z	Z	Z	Z
<b>Sul</b>	Z	Z	Z	NG	NM	NP	Z	Z	Z	PG	PM	PP	Z
<b>Ação do controle</b>	A MA MA	MA A MA	A A A	MMB MB B	MMB MB B	B B B	MB MB B	MB B MB	B B B	A MA MMA	A MA MMA	A A A	Z Z Z
<b>Ponto Crítico</b>	a	e	i	b	f	j	c	g	k	d	h	l	CONTROLE

A estratégia de controle com a localização dos pontos críticos deve envolver só as 13 regras detectadas com as análises realizadas. Não obstante para um controle mais preciso e comportamento ótimo na saída, é recomendável caracterizar todos os valores obtidos além dos pontos críticos nas regras. O comportamento dos pontos críticos deve refletir o caminho que é seguido para atingir o controle desejado. Na Fig. 4 mostra-se o trajeto do sinal de controle que é definida na Fig. 2.

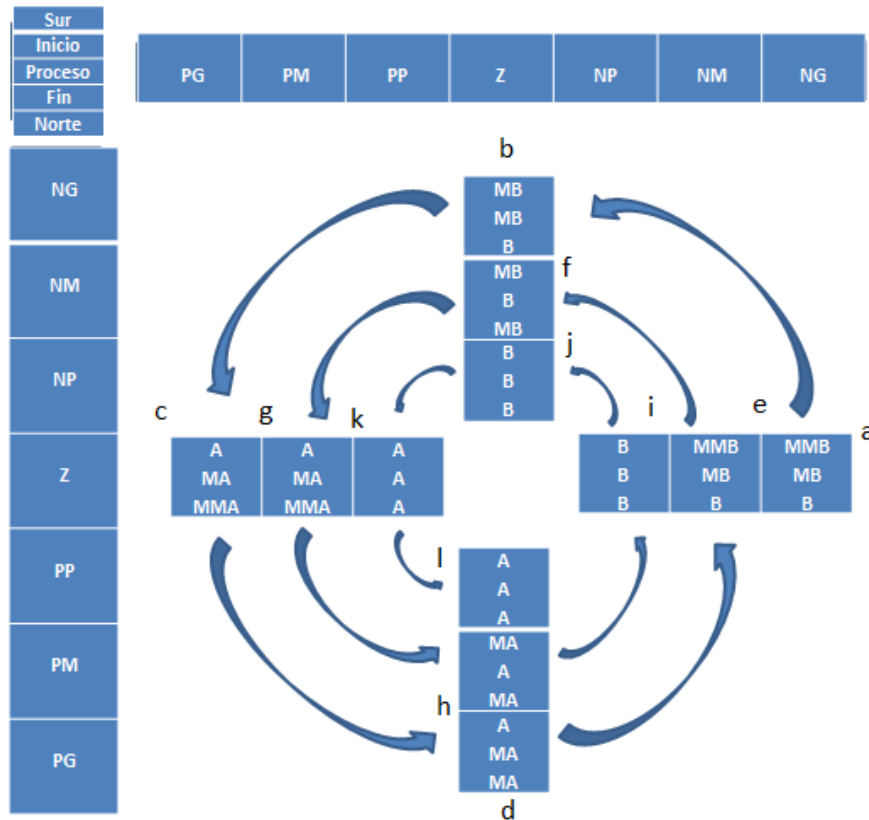


Figura 4. Regras que fazem parte dos pontos críticos no sinal do processo.

Após a definição da base de conhecimento, as regras são introduzidas na ferramenta onde é realizada a estrutura do controlador difuso. Neste trabalho, foram utilizados os blocos de controle e a ferramenta “fuzzy logic” no Labview. Na Fig 5 é apresentada a estrutura do processo.

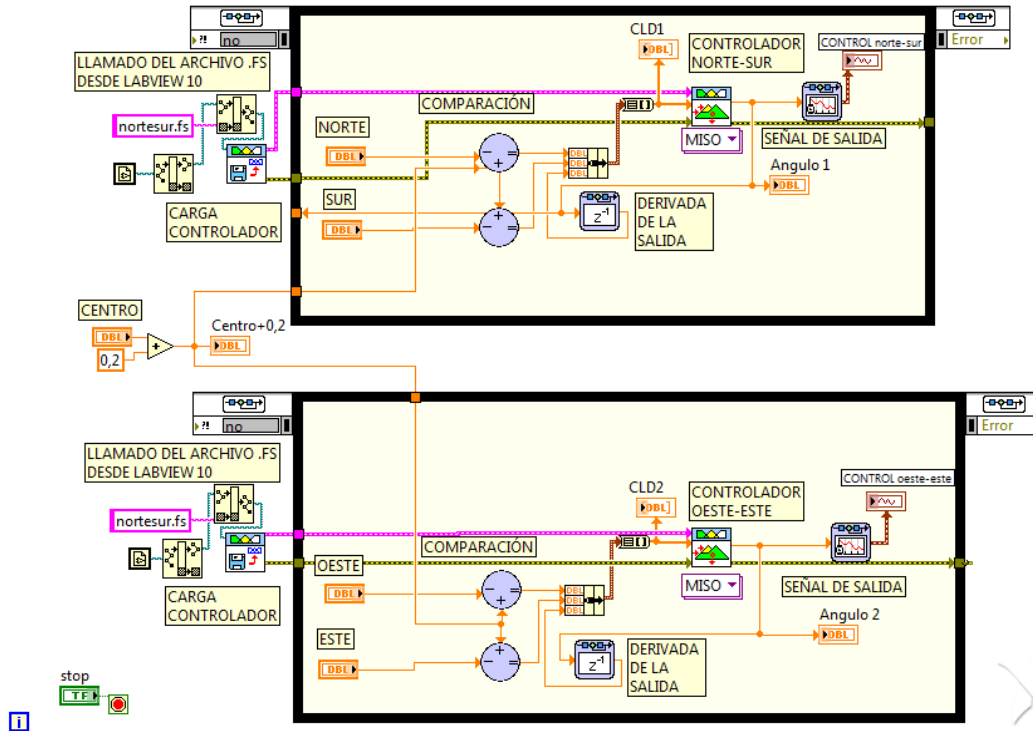


Figura 5. Estrutura do controlador no software Labview.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES

As variáveis de entrada do controlador são definidas de 0 até 1, de acordo com as unidades medidas pelos sensores fotoelétricos utilizados para medir a irradiação do sol. A estrutura do controlador calculado na ferramenta, foi sensibilizado com funções de pertinência do tipo triangular, que são especificadas por 3 pontos. Estes parâmetros são definidos pela função mostrada na Eq. (1).

$$\text{triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 \rightarrow x < a \\ (x - a)(b - a) \rightarrow a \leq x \leq b \\ (c - x)(c - b) \rightarrow b \leq x \leq c \\ 0 \rightarrow x > c \end{cases} \quad (1)$$

**Entradas do controlador.** A decomposição triangular do universo de discurso nas entradas podem se observar nas Fig. 6 e Fig. 7. Os valores de -3 até 3 fazem referência aos dados que os sensores utilizados podem medir. Os sensores só fazem leitura de valores positivos, mas no desenho do controlador foram utilizados dados negativos para serem subtraídos dos valores que deram positivo nas comparações de cada entrada. Por exemplo, se no norte os sensores fazem leitura de 2,5 e no sul de 0,5, a lógica do controlador subtrai para obter o valor do centro que nesse caso é 2. Assim no circuito de controle ao ser retroalimentado pode buscar rapidamente a posição desejada.

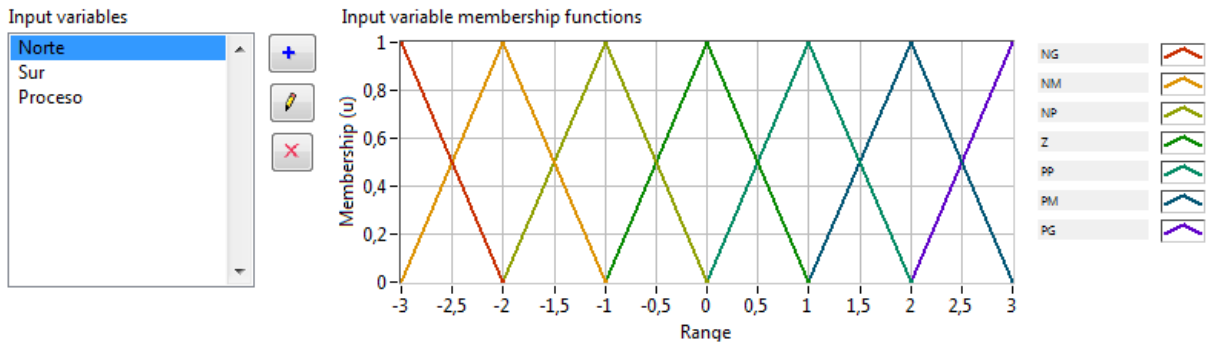


Figura 6. Funções de pertinência na entrada do controlador NORTE.

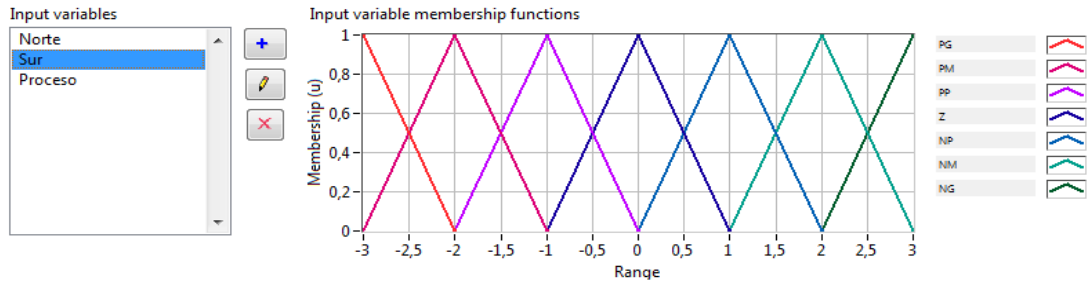


Figura 7. Funções de pertinência na entrada do controlador SUL.

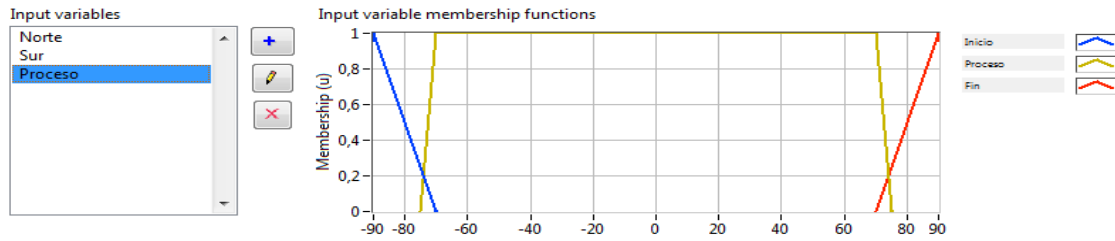


Figura 8. Derivada da saída.

Saída de controle.

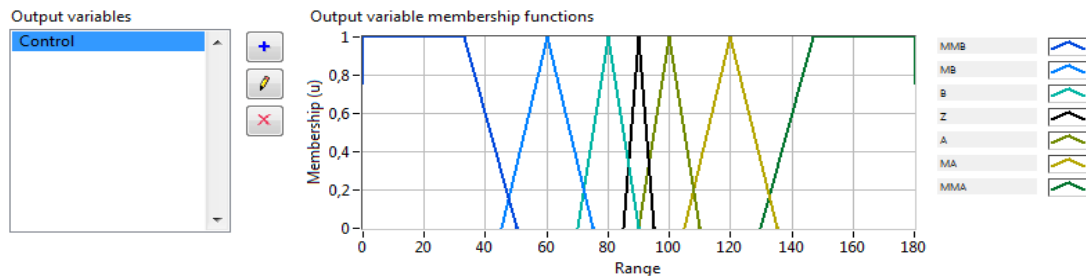


Figura 9. Sinal da saída do circuito de controle.

O controlador interage com as suas entradas e a saída para gerar um sinal característica até atingir o “set-point”. Esse sinal de saída são os dados que o atuador (motor) recebe para interpretar a sua posição. Com um total de 147 regras o controlador de norte-sul para o sistema, consegue exercer a ação de controle para orientar o sistema perpendicularmente com o sol.

A união conjuntiva “AND” foi utilizada, pois ela utiliza os valores mínimos entre as funções de pertinência. O método de defuzzificação centro de área foi utilizado, pois este calcula os valores mais próximos do centro das conexões formadas pela união conjuntiva.

Relacionamento das entradas e saídas na superfície do controlador com logica difusa.

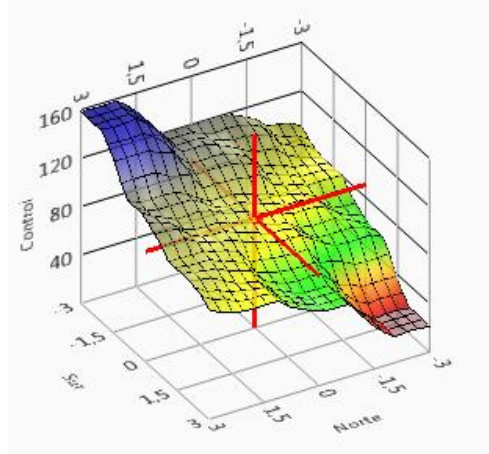


Figura 10. Vista da superfície do controlador, relação entrada-saída.

Na Fig. 10, pode se identificar a superfície do controlador, com as regras geradas nas Tab. 1 e Tab. 2. A ação de controle no sinal de saída pode variar de 0 até 180°, assim ele tem cobertura de todos os ângulos segundo o sol vai se movimentando nas diferentes horas do dia. Na Fig. 11 observe a relação das entradas e saídas no controle. O controlador mostra uma ótima resposta para os valores de entrada que foi desenhado, a saída é interpretada com os valores dos ângulos definidos.

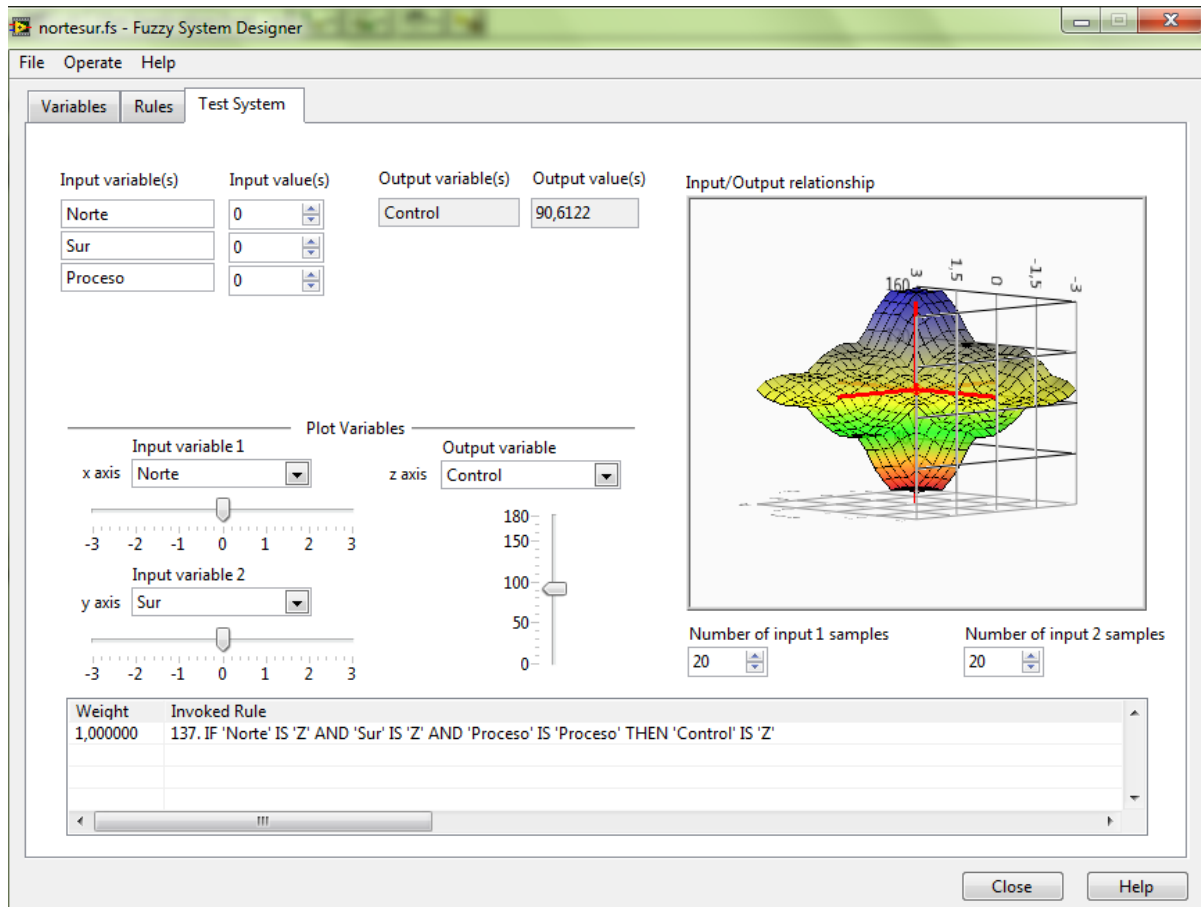


Figura 11. Controlador difuso para o rastreamento do sol.

## 5. CONCLUSÕES

Um novo método de análise de pontos críticos num sinal de controle foi apresentado neste artigo com base na teoria da lógica difusa, sendo concebido e validado no software Labview, usando as variáveis de entrada definidas pelo movimento do sol. O sistema é posicionado perpendicularmente ao sol, pela ação do controle. Os controladores difusos também garantem a total eliminação de erro de estado estacionário e conseguem estabilizar o sinal de saída em menor tempo de resposta. Outra vantagem do controlador difuso é que para sua execução não é necessário conhecer o modelo da planta a controlar, sendo apenas necessário conhecer o processo e o comportamento que se deseja na saída. Analisar os pontos críticos do sinal mostram os comportamentos mais significativos onde ocorrem mudanças no sinal, e assim é possível conseguir uma curva característica de saída suavizando o erro, para obter a linearidade.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho

## REFERÊNCIAS

- A. I. Technology and T. Nadu, "FUZZY LOGIC MPPT CONTROLLER WITH ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR SOLAR-WIND-BATTERY- DIESEL HYBRID POWER SYSTEM," vol. 59, no. 3, pp. 643–653, 2014.  
A F Baba, "Fuzzy logic controller," 2004.

- I. H. Altas and a. M. Sharaf, "A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 388–399, 2008.
- J. Karni, "Solar energy: the thermoelectric alternative.," *Nat. Mater.*, vol. 10, no. 7, pp. 481–482, 2011.
- J. Rômulo and V. Lira, "Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação," 2014.
- M. A. P. Cisneros and J. Vernon, "Sistemas de Lógica Difusa," pp. 1–14.
- P.-C. Cheng, B.-R. Peng, Y.-H. Liu, Y.-S. Cheng, and J.-W. Huang, "Optimization of a Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm Using the Particle Swarm Optimization Technique," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 5338–5360, 2015.
- REN21, "Renewables 2015, Global Status Report", pp 21-31, 2015

## **DESIGN AND VALIDATION OF A CONTROLLER BASED ON FUZZY LOGIC, TO ENSURE THE SUN SQUARENESS, ANALYZING THE CRITICAL POINTS IN CONTROL SIGNAL**

**Abstract.** *The growing demand for energy, is caused by the exponential increase of the world population. The use of solar energy through photovoltaic and CSP technologies is also growing. In this last one, it is necessary to use systems to ensure tracking and positioning perpendicular of the sun, for medium and high temperatures. This is commonly done by modeling, getting the angles that x the sun perpendicular to the capture system. Studies show that the use of solar tracking increases the energy delivery efficiency between 15% and 40%. Several techniques can be used for solar tracking, one of which is based on the use of controllers that use fuzzy logic. These control strategies allow us to analyse complex processes and make decisions to ensure a more precise answer. Thus, this paper presents the configuration of a fuzzy logic based controller, developed in Labview tool Release 11.00. To ensure the position perpendicular to the sun. The controller was created by correcting the output function, being compared with the error, reducing the "overshoot maximum (Mp)" and the "setting time (Ts)" and thus obtaining the wake of "MPPT" of the energy generated by solar systems. A methodology known as analysis of the critical points, was used.*

**Key words:** *Solar Tracking, Fuzzy Logic, Critics points.*