
UMA NOVA METODOLOGIA PARA FLUXOS DE CARGA FUZZY

Marcelo Murad Pereira Lima*

murad@zipmail.com.br

Carlos Alberto Favarin Murari*

murari@dsee.fee.unicamp.br

Marcelo Adorni Pereira*

adorni@altavista.net

*UNICAMP-FEEC-DSEE, Caixa Postal 6101, 13081-970, Campinas, São Paulo, BRASIL

ABSTRACT

During the elaboration of power system models, researchers always want to be as near as possible to reality, but the technical knowledge has been used only to determine the “*worst-case*” (Miranda et alli., 1990) or the best power value for the busbars. A few number of applications have been proposed to deal with information like “*the voltage at node k is high*”. This paper uses fuzzy numbers (bell shape) to represent imprecise variables and presents methods of fuzzy load flow that provide better results when compared with others and the results can also be interpreted through linguistic terms.

KEYWORDS: Fuzzy-set theory, load flow.

RESUMO

Durante a elaboração dos modelos para sistemas de energia elétrica, os pesquisadores sempre desejam estar o mais próximo possível da realidade, mas o conhecimento de técnicos e engenheiros tem sido utilizado apenas para a determinação do “*pior caso*” (Miranda et alli., 1990) ou dos melhores valores das potências nas barras. Poucas aplicações têm sido propostas para processar informações do tipo “*a tensão na barra k está alta*”. Esta pesquisa utiliza números nebulosos (forma de sino) para representar variáveis imprecisas e apresenta métodos de fluxo de carga *fuzzy* que fornecem melhores resultados

quando comparados com outros métodos e que podem ser interpretados através de termos lingüísticos.

PALAVRAS-CHAVE: Conjuntos nebulosos, fluxo de carga.

NOMENCLATURA

FCN - Fluxo de Carga Newton

FCL - Fluxo de Carga Linearizado

FCNTrap - Fluxo de Carga Newton *fuzzy* proposto em Miranda et alli. (1990)

FCLTrap - Fluxo de Carga Linearizado proposto em Miranda et alli. (1990)

B - Matriz utilizada no cálculo do FCL (Monticelli, A. (1983))

J - Matriz Jacobiana do FCN

Ω_k - Conjunto das barras conectadas à barra k

K - Conjunto das barras conectadas à barra k mais a própria barra k

\tilde{X} - Variável na forma *fuzzy*

\oplus , \ominus e \otimes - Adição, Subtração e Multiplicação *fuzzy* (Pereira, M. A. & Murari, C. A. F., 1999)

\otimes - Multiplicação *fuzzy* modificada (Apêndice A)

$\underline{\cos}$ e $\underline{\sin}$ - Cosseno e Seno *fuzzy* (Apêndice B)

1 INTRODUÇÃO

Nas fases de modelagem dos sistemas elétricos de potência e adequação das variáveis presentes nos sistemas reais, informações relativas aos conhecimentos e experiências de técnicos e engenheiros não podiam ser utiliza-

Artigo submetido em 20/12/00

1a. Revisão em 08/03/02

Aceito sob recomendação do Ed. Assoc. Prof. Denizar C. Martins

das integralmente até algum tempo atrás. Informações do tipo 'o fluxo na linha km está alto' dificilmente poderiam ser quantificadas e empregadas em um algoritmo computacional que implicasse em uma decisão imediata.

Os fluxos de carga determinísticos ou probabilísticos não eram capazes de representar tais informações (Kenarangui, R. & Seifi, A., 1994) integralmente, já que os determinísticos consideram os dados como constantes e os probabilísticos são baseados em repetições de eventos ou em dados experimentais.

Os fluxos de carga probabilísticos ainda apresentam a desvantagem de necessitarem de rotinas de cálculo mais complexas (Meliopoulos et alli., 1990).

Em muitos casos, as incertezas presentes nos sistemas eram ignoradas, ficando sem alternativas para observações ou análises do tipo 'se a tensão na barra k é muito baixa, desligar a carga nesta barra'.

A teoria de conjuntos nebulosos (Zadeh, L. A., 1965) e a teoria de possibilidades (Zadeh, L. A., 1978) desenvolvidas por Lofti Zadeh viabilizaram o desenvolvimento de fluxos de carga como em Miranda et alli. (1990) e Kenarangui, R. & Seifi, A. (1994). Nestes artigos são apresentados fluxos de carga que utilizam funções trapezoidais para a representação das variáveis do problema. Para efetuar os cálculos, os autores aplicam linearizações baseadas em série de Taylor, matemática intervalar e "alfa cortes" (Pedrycz, W. & Gomide, F., 1998).

Neste trabalho é proposto um fluxo de carga capaz de, a partir de dados de entrada (cargas, gerações, etc.) com imprecisões e utilizando operações matemáticas nebulosas, fornecer como resultados números nebulosos, utilizando-se funções de pertinência sinusoidais.

2 REPRESENTAÇÃO DOS DADOS

Como alternativa aos métodos Miranda et alli. (1990) e Kenarangui, R. & Seifi, A. (1994) que utilizam funções trapezoidais (figura 1) para os números nebulosos, este trabalho utiliza uma função sinusoidal conforme figura 2 e equação (1). Este tipo de representação possibilitou o desenvolvimento de operações algébricas de fácil implementação computacional e cujos dados e resultados são representados por apenas dois parâmetros.

$$\tilde{A} = A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - m_A}{\alpha_A}\right)^2} \quad (1)$$

A equação (1) também é definida por $A(m, \alpha)$, onde m

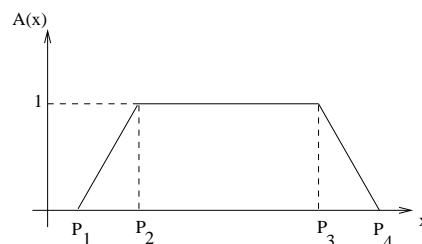


Figura 1: Função trapezoidal.

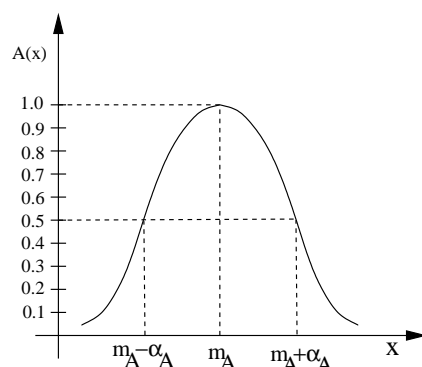


Figura 2: Função em forma de sino (Sinusoidal)

corresponde ao valor de maior grau, ou seja, $A(m) = 1$, e o parâmetro α é o grau de incerteza da função, sendo $A(m+\alpha) = A(m-\alpha) = 0,5$.

As imprecisões são atribuídas apenas aos dados de potência ativa e reativa. No banco de dados, os valores de potência ativa e reativa correspondem ao parâmetro m e o parâmetro α define uma determinada imprecisão, que nesta aplicação foi fixada em 5% de m . Para a função trapezoidal os pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 correspondem aos pontos $0,93.m, 0,95.m, 1,05.m$ e $1,07.m$ respectivamente.

3 DESENVOLVIMENTO DOS FLUXOS DE CARGA FUZZY

Os fluxos de carga *fuzzy* são fundamentados nos fluxos de carga convencionais: FCN e FCL (Monticelli, A., 1983), onde algumas operações matemáticas foram substituídas por operações nebulosas.

3.1 Fluxo de Carga Linearizado Fuzzy – FCLF

O FCLF é simulado em duas iterações para que se possa incluir as perdas de potência ativa e assim obter uma melhor estimativa para os ângulos.

Procedimento:

- A partir das potências nas barras (\tilde{P}) resolver o sistema matricial:

$$[\tilde{\theta}] = [B]^{-1} \otimes [\tilde{P}] \quad (2)$$

- De posse desta primeira estimativa para os ângulos, calcular as perdas nas ligações:

$$\tilde{P}_{km}^{Perdas} = \tilde{\theta}_{km}^2 \otimes g_{km} \quad (3)$$

- Adicionar metade dos valores das perdas nas respectivas barras terminais e obter um novo vetor \tilde{P} que é aplicado no sistema matricial da equação (2), obtendo-se os valores finais para os ângulos.
- Calcular os fluxos de potência ativa nas linhas:

$$\tilde{P}_{km} = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \otimes \tilde{\theta}_{km} \quad (4)$$

Com isto tem-se como resultado as variáveis de saída do FCL na forma de números nebulosos, conforme equação (1).

3.2 Fluxo de Carga Newton Fuzzy - FCNF

O FCNF foi desenvolvido da seguinte maneira:

- Com base no ponto de maior grau (m) dos dados de entrada, resolver um FCN convencional, obtendo-se os valores dos ângulos e das magnitudes das tensões, que serão os valores correspondentes aos pontos centrais (m) das distribuições de possibilidade para estas variáveis.
- Para determinar os valores dos desvios (α) destas variáveis, utilizar a matriz Jacobiana obtida na última iteração do FCN, seguindo a equação (5), onde o vetor $\underline{\alpha}_{LIQPQ}$ é formado pelos valores de alfa de $\tilde{P}(m_P, \alpha_P)$ e $\tilde{Q}(m_Q, \alpha_Q)$, fornecidos nos dados iniciais.

$$[\alpha_{\theta v}] = [J]^{-1} * [\alpha_{LIQPQ}] \quad (5)$$

- De posse das distribuições de possibilidade para os ângulos e magnitudes das tensões, calcular as po-

tências geradas nas barras (equação (6)).

$$\begin{aligned} \tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes [G_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \oplus \\ &\quad \oplus B_{km} \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \\ \tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes [G_{km} \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \Theta \\ &\quad \Theta B_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \end{aligned} \quad (6)$$

- Calcular os fluxos:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{km} &= g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 \Theta \text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes \\ &\quad \otimes [g_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \oplus b_{km} \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \\ \tilde{P}_{mk} &= g_{km} \otimes (\text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_m)^2 \Theta \text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes \\ &\quad \otimes [g_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \Theta b_{km} \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{km} &= -(b_{km} + b_k^{shunt}) \otimes \tilde{V}_k^2 \oplus \text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes \\ &\quad \otimes [b_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \Theta g_{km} \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \\ \tilde{Q}_{mk} &= -(b_{km} + b_k^{shunt}) \otimes (\text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_m)^2 \oplus \text{tap}_{km} \otimes \\ &\quad \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes [b_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \oplus g_{km} \otimes \\ &\quad \otimes \underline{\sin}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km})] \end{aligned} \quad (8)$$

- Calcular as perdas:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{km}^{Perdas} &= g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 \oplus g_{km} \otimes (\text{tap}_{km} \otimes \tilde{V}_m)^2 \Theta \\ &\quad \Theta 2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m g_{km} \otimes \underline{\cos}(\tilde{\theta}_{km} \oplus \varphi_{km}) \end{aligned} \quad (9)$$

Observe que as equações (6) e (9) utilizam o multiplicador nebuloso de Pereira, M. A. & Murari, C. A. F. (1999) e as equações (7) e (8), o multiplicador do Apêndice A.

Com estes valores pode-se obter as distribuições de possibilidade das variáveis de saída. Fez-se necessária a utilização de dois tipos de função de multiplicação pois algumas expressões utilizadas nos cálculos possuem termos com muitas multiplicações e como as operações com números nebulosos não são tão “comportadas” como as da matemática convencional (Pedrycz, W & Gomide, F., 1998) eram obtidos valores para os desvios não compatíveis com os esperados.

4 SIMULAÇÃO

As tabelas apresentadas nesta seção contêm resultados obtidos para as versões de fluxo de carga *fuzzy* aplicadas ao sistema IEEE30 (Freris, L. L. & Sasson, A. M., 1968).

Os resultados obtidos com FCLF e FCNF, correspondentes aos pontos $m-\alpha$ e $m+\alpha$, são comparados com os resultados obtidos com FCL e FCN aplicados em duas etapas, uma com os dados para a potência $P_{min} = m_p - \alpha_p$, $Q_{min} = m_Q - \alpha_Q$ e outra para a potência $P_{max} = m_p + \alpha_p$, $Q_{max} = m_Q + \alpha_Q$.

Estes pontos também correspondem a P_2 e P_3 na função trapezoidal, respectivamente.

Na impossibilidade de incluir todos os resultados, as tabelas apresentam parte deles.

4.1 Resultados com o FCLF

A tabela 1 apresenta os valores dos ângulos das tensões nodais.

Tabela 1: Ângulos (graus)

Barra	FCL		FCLF		FCLTrap	
	$\theta_{P_{min}}$	$\theta_{P_{max}}$	$\theta_{(m-\alpha)}$	$\theta_{(m+\alpha)}$	θ_{P_2}	θ_{P_3}
2	-5,44	-6,04	-5,39	-6,10	-5,41	-6,06
3	-8,16	-9,05	-8,12	-9,08	-8,15	-9,04
4	-9,74	-10,8	-9,70	-10,9	-9,74	-10,8
5	-14,1	-15,6	-14,0	-15,7	-14,0	-15,6
11	-14,6	-16,1	-14,5	-16,2	-14,5	-16,2
12	-15,6	-17,3	-15,5	-17,3	-15,7	-17,2
13	-15,6	-17,3	-15,5	-17,3	-15,5	-17,2
14	-16,6	-18,4	-16,6	-18,5	-16,6	-18,4
29	-17,6	-19,5	-17,5	-19,5	-17,5	-19,4
30	-18,5	-20,5	-18,4	-20,5	-18,4	-20,4

A tabela 2 apresenta os erros percentuais dos ângulos obtidos pelo FCLF e o proposto em Miranda et alli. (1990).

Tabela 2: Erro (%) para os Ângulos

Barra	FCLF		FCLTrap	
	$\theta_{(m-\alpha)}$	$\theta_{(m+\alpha)}$	θ_{P_2}	θ_{P_3}
2	1,04	-0,91	2,57	-2,41
3	0,43	-0,36	2,10	-1,97
4	0,43	-0,37	2,13	-2,00
5	0,36	-0,31	2,14	-2,01
11	0,31	-0,26	2,10	-1,97
12	0,28	-0,24	2,09	-1,96
13	0,28	-0,24	2,09	-1,96
14	0,26	-0,22	2,09	-1,96
29	0,25	-0,22	2,08	-1,95
30	0,24	-0,21	2,07	-1,94

Além dos erros percentuais correspondentes aos pontos P_2 e P_3 serem maiores que os de $\theta_{(m-\alpha)}$ e $\theta_{(m+\alpha)}$, a sua função de pertinência vale 1 (função trapezoidal (Miranda et alli., 1990)) enquanto que para $\theta_{(m-\alpha)}$ e $\theta_{(m+\alpha)}$ vale 0,50 (figura 2).

A tabela 3 apresenta resultados para os fluxos de potência ativa nas linhas e a tabela 4 expõe os erros percentuais para o FCLF e o proposto em Miranda et alli. (1990).

Tabela 3: Fluxo de Potência Ativa (MW)

Linha	FCL		FCLF		FCLTrap	
	P_{km}^{min}	P_{km}^{max}	$P_{km}^{m-\alpha}$	$P_{km}^{m+\alpha}$	$P_{km}^{P_2}$	$P_{km}^{P_3}$
1 2	165,2	183,5	163,5	185,2	164,5	184,1
1 3	76,86	85,29	76,53	85,60	76,89	85,25
2 4	43,22	47,87	43,37	47,72	43,32	47,78
3 4	73,11	80,98	72,80	81,29	72,86	81,22
14 15	1,22	1,35	1,22	1,35	0,845	1,725
16 17	2,61	2,88	2,60	2,89	2,037	3,452
15 18	5,28	5,84	5,28	5,84	4,874	6,240
18 19	2,22	2,46	2,22	2,46	1,679	3,006
29 30	3,50	3,87	3,50	3,87	3,431	3,933
8 28	-0,32	-0,35	-0,32	-0,35	0,084	-0,75

Tabela 4: Erro (%) para Fluxos de Potência Ativa

Linha	FCLF		FCLTrap	
	$P_{km}^{m-\alpha}$	$P_{km}^{m+\alpha}$	$P_{km}^{P_2}$	$P_{km}^{P_3}$
1 2	1,04	-2,98	0,44	-0,34
1 3	0,43	-2,40	-0,04	0,05
2 4	-0,35	-1,65	-0,22	0,20
3 4	0,43	-2,37	0,34	-0,30
14 15	0,10	-2,05	30,75	-27,8
16 17	0,17	-2,11	21,97	-19,9
15 18	0,05	-1,99	7,70	-6,85
18 19	0,11	-2,05	24,37	-22,2
29 30	0,00	-1,95	1,97	-1,63
8 28	0,13	-1,88	-133	123,9

Novamente o FCLF apresentou melhores resultados do que a metodologia proposta em Miranda et alli. (1990) pois o FCLF apresenta todos os erros inferiores a 3% o que não ocorre com o fluxo de carga proposto em Miranda et alli. (1990), alternando resultados bons e ruins (tabela 4).

No artigo Miranda et alli. (1990) não é proposta uma metodologia para o cálculo da potência gerada na barra de referência e para as perdas na transmissão. As tabelas 5 e 6 apresentam estes valores, obtidos com o FCLF, bem como os erros percentuais, comparados com o FCL.

Tabela 5: Potência Ativa Gerada (MW) e Erro

Barra	FCL		FCLF		Erro %	
	P_g^{min}	P_g^{max}	$P_g^{m-\alpha}$	$P_g^{m+\alpha}$	$P_g^{m-\alpha}$	$P_g^{m+\alpha}$
1	247,4	263,4	239,9	270,8	0,846	-0,74

Tabela 6: Perdas (MW) na Transmissão e Erros

Linha	FCL		FCLF		Erro (%)	
	P_{min}^{Per}	P_{max}^{Per}	$P_{m-\alpha}^{Per}$	$P_{m+\alpha}^{Per}$	$P_{m-\alpha}^{Per}$	$P_{m+\alpha}^{Per}$
1 2	2,14	2,61	2,307	2,940	-7,94	-12,6
1 3	1,17	1,42	1,249	1,554	-7,22	-9,18
2 4	0,46	0,56	0,484	0,583	-4,87	-3,46
3 4	0,30	0,37	0,312	0,387	-3,28	-4,85
10 17	0,005	0,006	0,005	0,006	0	0
10 21	0,030	0,037	0,031	0,037	-0,99	0
10 22	0,014	0,017	0,014	0,017	0	0

O FCLF mostra ter boa precisão e utiliza uma função de pertinência de fácil implementação.

4.2 Resultados com o FCNF

Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados para as magnitudes e os ângulos das tensões obtidas a partir das simulações dos fluxos FCN, FCNF e FCNTrap.

Tabela 7: Magnitudes das Tensões (p.u.)

Barra	FCN		FCNF		FCNTrap	
	V_{Pmin}	V_{Pmax}	$V_{(m-\alpha)}$	$V_{(m+\alpha)}$	V_{P2}	V_{P3}
2	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043
3	1,023	1,021	1,023	1,021	1,023	1,021
4	1,015	1,012	1,015	1,012	1,015	1,012
5	1,010	1,010	1,010	1,010	1,010	1,010
11	1,082	1,082	1,082	1,082	1,082	1,082
12	1,058	1,055	1,058	1,055	1,058	1,055
13	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071
14	1,045	1,039	1,045	1,039	1,045	1,039
29	1,010	1,002	1,010	1,002	1,010	1,002
30	0,999	0,990	0,999	0,990	1,000	0,990

Tabela 8: Ângulos (graus)

Barra	FCN		FCNF		FCNTrap	
	θ_{Pmin}	θ_{Pmax}	$\theta_{(m-\alpha)}$	$\theta_{(m+\alpha)}$	θ_{P2}	θ_{P3}
2	-5,25	-5,75	-5,25	-5,75	-5,14	-5,86
3	-7,63	-8,37	-7,63	-8,36	-7,52	-8,47
4	-9,21	-10,1	-9,21	-10,1	-9,08	-10,2
5	-13,8	-15,0	-13,8	-14,9	-13,5	-15,2
11	-14,1	-15,5	-14,1	-15,5	-13,9	-15,6
12	-15,1	-16,6	-15,1	-16,6	-14,9	-16,8
13	-15,1	-16,6	-15,1	-16,6	-14,9	-16,8
14	-15,9	-17,5	-15,9	-17,5	-15,8	-17,7
29	-16,6	-18,3	-16,6	-18,3	-16,4	-18,5
30	-17,4	-19,2	-17,4	-19,2	-17,3	-19,4

Os resultados para as magnitudes das tensões apresentam erros inferiores a 0,01% para o FCNF e também para o fluxo de carga proposto em Miranda et alli. (1990). Para os ângulos, a rotina de Miranda et alli. (1990) não apresenta resultados tão bons quanto para as magnitudes das tensões (erros de até 2,12%), enquanto que o FCNF apresenta erros inferiores a 0,04%. Na tabela 9 tem-se os resultados para a potência ativa gerada.

Nota-se que os resultados para o FCNF apresentam erros abaixo de 0,10% e para a rotina de Miranda et alli. (1990) os erros estão abaixo de 1,85%. Na tabela 10

Tabela 9: Potência Ativa Gerada (MW)

Barra	FCN		FCNF		FCNTrap	
	P_g^{min}	P_g^{max}	$P_g^{m-\alpha}$	$P_g^{m+\alpha}$	P_g^{P2}	P_g^{P3}
1	249,5	272,6	249,5	272,5	249,7	272,3

Tabela 11: Erro (%) para Potência Reativa Gerada

Barra	FCNF		FCNTrap	
	$Q_g^{m-\alpha}$	$Q_g^{m+\alpha}$	Q_g^{P2}	Q_g^{P3}
1	8,48	-7,17	5,111	-4,64
2	3,42	-2,71	4,073	-3,07
5	-6,41	5,08	5,125	-3,81
8	0,33	2,16	-8,27	-4,98
11	0,06	0,06	0,179	-0,05
13	0,14	0,12	0,316	-0,01

tem-se a potência reativa gerada e na tabela 11 os respectivos erros percentuais.

Tabela 10: Potência Reativa Gerada (MVar)

Barra	FCN		FCNF		FCNTrap	
	Q_g^{min}	Q_g^{max}	$Q_g^{m-\alpha}$	$Q_g^{m+\alpha}$	Q_g^{P2}	Q_g^{P3}
1	-15,8	-18,8	-14,4	-20,1	-14,9	-19,6
2	32,47	39,10	31,36	40,16	31,14	40,30
5	14,79	19,00	15,74	18,03	14,03	19,72
8	-3,07	3,67	-3,06	3,59	-3,32	3,85
11	14,63	16,45	14,62	16,44	14,61	16,46
13	9,69	12,55	9,68	12,54	9,66	12,55

Para a potência reativa, os erros estão todos abaixo de 8,50%, ressaltando mais uma vez que os resultados de Miranda et alli. (1990) correspondem ao valor da função de pertinência igual a 1 enquanto que para a função sinusoidal 0,5.

Podem ser vistos através das tabelas 12 e 13, alguns valores de fluxos de potência ativa e respectivos erros.

Tabela 12: Fluxo Ativo (MW)

Linha	FCN		FCNF		FCNTrap	
	P_{km}^{min}	P_{km}^{max}	$P_{km}^{m-\alpha}$	$P_{km}^{m+\alpha}$	P_{km}^{P2}	P_{km}^{P3}
1 3	79,45	86,84	79,59	86,68	78,38	87,89
4 12	40,17	44,39	40,05	44,50	40,12	44,44
16 17	2,677	2,934	2,778	2,832	2,61	3,00
15 18	5,252	5,807	5,456	5,602	5,19	5,87
18 19	2,183	2,410	2,293	2,299	2,14	2,45
25 27	-4,75	-5,32	-5,06	-5,01	-5,40	-4,67
8 28	-0,63	-0,47	-0,63	-0,47	-0,61	-0,48
6 28	18,06	19,84	18,15	19,75	17,91	19,99

As tabelas 14 e 15 apresentam resultados para alguns fluxos reativos e respectivos erros.

Tabela 13: Erros (%) para Fluxos Ativos

Linha	FCNF		FCNTrap	
	$P_{km}^{m-\alpha}$	$P_{km}^{m+\alpha}$	P_{km}^{P2}	P_{km}^{P3}
1 3	-0,18	0,181	1,34	-1,21
4 12	0,286	-0,25	0,12	-0,10
16 17	-3,80	3,470	2,33	-2,13
15 18	-3,88	3,517	1,28	-1,15
18 19	-5,07	4,594	1,86	-1,68
25 27	-6,57	5,845	1,64	-1,59
8 28	-0,5	0,456	2,75	-3,94
6 28	-3,87	3,540	0,82	-0,74

Tabela 14: Fluxo Reativo (MVAr)

Linha	FCN		FCNF		FCNTrap	
	Q_{km}^{min}	Q_{km}^{max}	$Q_{km}^{m-\alpha}$	$Q_{km}^{m+\alpha}$	Q_{km}^{P2}	Q_{km}^{P3}
1 3	4,58	5,22	4,57	5,21	4,61	5,14
4 12	13,32	14,07	13,62	13,77	13,33	14,04
16 17	1,02	1,36	1,02	1,37	1,04	1,34
15 18	1,47	1,75	1,46	1,76	1,50	1,72
18 19	0,55	0,73	0,55	0,74	0,57	0,71
25 27	-0,30	-0,65	-0,29	-0,65	-0,35	-0,59
8 28	-3,05	-1,91	-3,00	-1,97	-3,08	-1,89
6 28	-9,73	-9,68	-9,71	-9,70	-9,75	-9,66

Tabela 15: Erros (%) para Fluxos Reativos

Linha	FCNF		FCNTrap	
	$Q_{km}^{m-\alpha}$	$Q_{km}^{m+\alpha}$	Q_{km}^{P2}	Q_{km}^{P3}
1 3	0,24	0,18	-0,67	1,42
4 12	-2,29	2,17	-0,12	0,21
16 17	0,73	-0,43	-2,01	1,64
15 18	0,73	-0,55	-1,95	1,70
18 19	0,96	-0,64	-3,02	2,38
25 27	1,82	-1,01	-18,8	8,45
8 28	1,71	-3,41	-0,94	0,84
6 28	0,18	-0,22	-0,29	0,24

Na tabela 16 tem-se as perdas ativas nessas ligações e na tabela 17 os respectivos erros.

Tabela 16: Perdas (MW) na Transmissão

Barra	FCN		FCNF		FCNTrap	
	P_{min}^{Per}	P_{max}^{Per}	$P_{m-\alpha}^{Per}$	$P_{m+\alpha}^{Per}$	P_{P2}^{Per}	P_{P3}^{Per}
1 3	2,558	3,056	2,559	3,054	2,715	2,887
4 12	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,06	0,062
16 17	0,006	0,008	0,006	0,008	-0,01	0,023
15 18	0,030	0,037	0,029	0,037	0,016	0,050
18 19	0,003	0,004	0,003	0,004	-0,007	0,013
25 27	0,024	0,030	0,024	0,030	0,006	0,048
8 28	0,0007	0,0002	0,0003	0,0002	-0,009	0,009
6 28	0,055	0,067	0,055	0,067	0,054	0,068

Como pode ser constatado na tabela 16, os resultados para o fluxo de carga proposto em Miranda et alli. (1990) contemplam valores negativos para as perdas na transmissão, o que é ressaltado no mesmo artigo, enquanto que para a metodologia aqui proposta, isto não

Tabela 17: Erros (%) para Perdas Ativas

Barra	FCNF		FCNTrap	
	$P_{m-\alpha}^{Per}$	$P_{m+\alpha}^{Per}$	P_{P2}^{Per}	P_{P3}^{Per}
1 3	-0,02	0,069	-6,1	5,5
4 12	0	0	-	-
16 17	1,613	0	246,1	-192
15 18	0,678	0,271	46,4	-36,2
18 19	0	0	318,9	-244
25 27	0,424	0	74,7	-57,4
8 28	57,14	0	1222	4486
6 28	0	0	2,6	-1,8

Tabela 18: Quantidade de Flops

FCN	FCNF	FCNTrap
3.009.189	1.463.066	2.132.716

ocorre e os maiores erros ocorrem nas linhas onde as perdas são muito baixas, como por exemplo na linha 8-28.

5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os algoritmos de fluxo de carga foram programados seguindo uma mesma metodologia, com diferenças apenas nas partes que contemplam os cálculos nebulosos.

A tabela 18 apresenta as respectivas quantidades de flops, obtidos com o MatLab[®], para o sistema IEEE30.

A quantidade de flops para o FCN corresponde ao FCN aplicado nos pontos $m-\alpha$, m e $m+\alpha$. O FCNF apresenta menor quantidade de flops porque não utiliza a metodologia de "alfa cortes" (Pedrycz, W. & Gomide, F., 1998).

O FCLF mostrou ótimos resultados, permitindo que técnicas de análise para o planejamento possam ser implementadas com boa precisão.

O FCNF proporciona bons resultados e em muitos casos melhores que os obtidos em Miranda et alli. (1990) e, ainda, solucionou o problema das perdas negativas.

A representação dos números nebulosos através da equação (1), além de gerar resultados com boa precisão e menor quantidade de flops, ainda permite ampliar a análise dos resultados, uma vez que entre os pontos de mínima e máxima potência, a função de pertinência apresenta valores contidos no intervalo $[0,5; 1]$, enquanto que para a função trapezoidal a pertinência é sempre unitária. A função sinusoidal permite aplicações que traduzem os resultados numéricos em lingüísticos, como exemplifica a figura 3.

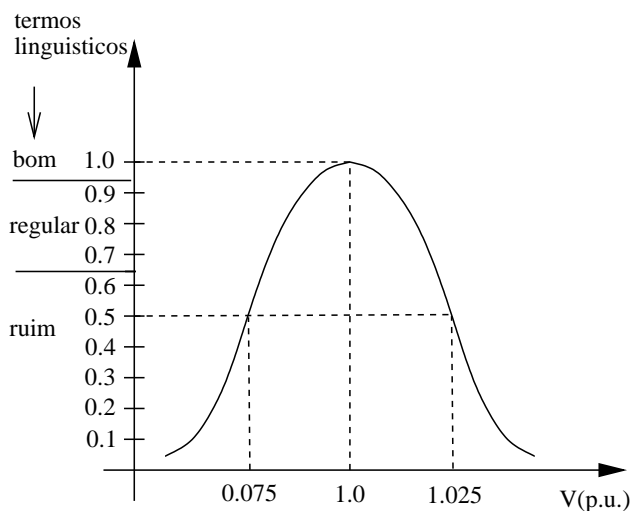


Figura 3: Exemplo de interpretação de resultados

APÊNDICE A

Foi necessária a definição de uma nova função de multiplicação para ser utilizada nos cálculos dos fluxos, porque a definida em Pereira, M. A. & Murari, C. A. F. (1999) não estava proporcionando os resultados esperados.

Como na matemática nebulosa deve-se sempre escolher as melhores funções e operações, em função do tipo de aplicação com o qual se está trabalhando, definiu-se a seguinte função:

$$A(m_A, \alpha_A) = X \otimes Y$$

$$m_A = m_X * m_Y$$

$$\alpha_A = \alpha_{ord}(2);$$

onde $\alpha_{ord}(2)$ é o segundo elemento do vetor:

$$\alpha_{ord} = \text{str}(|m_A - [(m_X - \alpha_X) * (m_Y - \alpha_Y)]|,$$

$$|m_A - [(m_X - \alpha_X) * (m_Y + \alpha_Y)]|,$$

$$|m_A - [(m_X + \alpha_X) * (m_Y - \alpha_Y)]|,$$

$$|m_A - [(m_X + \alpha_X) * (m_Y + \alpha_Y)]|)$$

e *str* é uma rotina que coloca os elementos em ordem crescente.

APÊNDICE B

Caso fossem utilizadas as funções seno e cosseno convencionais nos cálculos nebulosos, os resultados ficariam a desejar, e assim sendo, estabeleceu-se uma formulação para efetuar o cálculo destas operações de forma nebulosa (ressalta-se que estes cálculos são uma aproximação de um seno ou cosseno *fuzzy*).

Seno *fuzzy*:

$$\sin fuzzy(m_\theta, \alpha_\theta) = (m_{\sin \theta}, \alpha_{\sin \theta})$$

$$m_{\sin \theta} = (\sin(m_\theta - \alpha_\theta) + \sin(m_\theta + \alpha_\theta))/2$$

$$\alpha_{\sin \theta} = (|(|m_{\sin \theta}| - |\sin(m_\theta - \alpha_\theta)|)| +$$

$$|(|m_{\sin \theta}| + |\sin(m_\theta + \alpha_\theta)|)|)/2$$

Cosseno *fuzzy*:

$$\cos fuzzy(m_\theta, \alpha_\theta) = (m_{\cos \theta}, \alpha_{\cos \theta})$$

$$m_{\cos \theta} = (\cos(m_\theta - \alpha_\theta) + \cos(m_\theta + \alpha_\theta))/2$$

$$\alpha_{\cos \theta} = (|(|m_{\cos \theta}| - |\cos(m_\theta - \alpha_\theta)|)| +$$

$$|(|m_{\cos \theta}| + |\cos(m_\theta + \alpha_\theta)|)|)/2$$

REFERÊNCIAS

- Freris, L.L. & Sasson, A.M. (1968). Investigation of the load-flow problem, *Proceedings of IEE*, Vol. 115 (10), pp. 1459-1470.
- Kenarangui, R. & Seifi, A. (1994). Fuzzy power flow analysis, *Electric power systems research*, 29: pp. 105-109.
- Meliopoulos, A.P S., Cokkinides, G.J. & Chao, X.Y. (1990). A new probabilistic power flow analysis method, *IEE Transactions on Power Systems*, Vol 5 (1), pp. 182-189.
- Miranda, V., Matos, M.A.A.C. & Saraiva, J.T. (1990). Fuzzy load flow - New algorithms incorporating uncertain generation and load representation, *Proceedings of the Tenth Power systems Computation Conferece*, Graz, Austria, pp. 621-627.
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.
- Pedrycz, W. & Gomide, F. (1998). *An introduction to fuzzy sets: Analysis and design*. A Bradford Book - The MIT Press.
- Pereira, M.A. & Murari, C.A.F. (1999). Electrical distribution system fuzzy load estimation, *ISAP'99*, Rio de Janeiro, pp. 370-375.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets, *Information and Control*, Vol. 8, New York, pp. 338-353.
- Zadeh, L.A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, 1: pp. 3-28.