

Análise do uso do programa de análise de redes – (anarede) para cálculo de queda de tensão em rede de distribuição

Eber de Castro Diniz
Universidade Federal do Ceará
eber@dee.ufc.br

**Francisco Carlos Lima
Lopes**
Companhia Energética do Ceará
- COELCE
fcocarlos@coelce.com.br

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo mostrar de forma clara e precisa que o uso do Programa de Análise de Redes – ANAREDE não é aconselhável para o cálculo de queda de tensão em redes de distribuição 13.8kV com cargas desequilibradas, para isto foram feitos cálculos usando o método momentos de carga para determinar a queda de tensão existente entre o barramento de 13,8kV na SE PAP até o barramento de 13,8kV da SE do shopping Iguatemi que é atendido pelo alimentador 01F2-PAP e comparado com o uso do ANAREDE que neste caso utiliza o método de Newton-Rapson, onde foi constatado que o Programa de

Palavras-chave: ANAREDE. Fluxo de Carga. Sistemas de Distribuição. Método dos Momentos de Carga.

Abstract

The main goal of this work is to show that the use of the application ANAREDE is not suitable for distribution system with unsymmetrical loads. To achieve this conclusion some methods had been used to make a comparative performance between ANAREDE, Load Momentum algorithm and experimental results from the circuit called 01F2-PAP, fed by the Substation SE PAP, which in turn feed Iguatemi Shopping Center.

Keywords: ANAREDE. Load Flow. Distribution System. Load Momentum Method.

1 Introdução

O uso de equipamentos elétricos e eletrônicos cada vez mais sofisticados provocou pressões junto às concessionárias para que o fornecimento de energia elétrica tenha uma variação mínima nos níveis de tensão. O sistema elétrico de potência deve obedecer aos padrões legais estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, resolução Nº 505, de 26 de Novembro de 2001 estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. A motivação principal para a realização desse trabalho foi o fato do nível de tensão no barramento do shopping Iguatemi estar apresentando uma queda de tensão em torno de 800 V às 18h00min em relação ao barramento de MT da SE PAP de onde vem o seu suprimento. Este alimentador tem um percurso de 4,2 km, os condutores são em cabo “space” de 240mm² que suportam uma corrente máxima de 572 A. Portanto este trabalho tem como objetivo mostrar o cálculo da queda de tensão usando o método momentos de carga e compará-lo com o cálculo feito pelo Programa de Análise de Redes – ANAREDE, que utiliza o método de Newton-Rapson (ANAREDE, 2008).

2 Cálculo da Queda de Tensão Utilizando o Método dos Momentos de Carga

Nos problemas do âmbito de planejamento e projeto de sistemas de distribuição, há muito mais interesse em se determinar a queda de tensão no alimentador, do que a própria tensão (KAGAN, 2005). A queda de tensão se define como a diferença entre as tensões de dois pontos distintos do alimentador num determinado instante de tempo. Esses pontos são quaisquer, embora os extremos do alimentador sejam de interesse especial. O conhecimento da queda de tensão entre os extremos do alimentador é fundamental nos projetos de implantação, reforma e extensão (PINTO, 1985).

A equação (1) se apresentou muito conveniente para o cálculo de tensão (SHORT, 2001):

$$V_1 = V_0 - Z \frac{ST}{V_0} \cos(\theta - \phi) \tag{1}$$

A intenção é alterá-la de modo a que passe a expressar a queda de tensão:

$$\Delta V = V_0 - V_1 \tag{2}$$

Para fazer isto basta levar em conta que $\cos(\theta - \phi) = \cos \theta \cdot \cos \phi + \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \phi$. Assim,

$$\Delta V = \frac{ST}{V_0} (Z \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi + Z \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \phi) \tag{3}$$

$$\Delta V = \frac{ST \cdot l}{V_0} (r \cdot \cos \phi + x \cdot \text{sen} \phi) \tag{4}$$

ou

$$\Delta V = ST \cdot l \cdot G \tag{5}$$

sendo ST é a carga total do alimentador que é concentrada em seu extremo e

$$G = \frac{(r \cdot \cos \phi + x \cdot \text{sen} \phi)}{V_0} \tag{6}$$

é um parâmetro que é função da bitola e espaçamento dos condutores, da tensão nominal do alimentador e do fator de potência da carga. Representa a *queda de tensão unitária*, isto é, a queda de tensão por unidade de comprimento do alimentador e de potência da carga. Como se verá posteriormente, G é função também do número de fases e de condutores do circuito.

A queda de tensão se expressa com vantagem em porcentagem da tensão do início do alimentador ou da tensão nominal:

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_1}{V_0} 100\% \tag{7}$$

A queda de tensão percentual pode ser dada ainda pela equação (2.8), desde que a expressão da queda de tensão unitária se altere para:

$$G = \frac{(r \cdot \cos \phi + x \cdot \text{sen} \phi)}{V_0^2} 100 \tag{8}$$

3 Método Newton-Rapson

Em Análise numérica, o Método de Newton (ou método Newton-Raphson) tem o objetivo de estimar as raízes de uma *função*. Para isso, toma-se um ponto qualquer da função, calcula-se a equação da *tangente (derivada)* da função nesse ponto, calcula-se o intercepto da tangente ao eixo das *abscissas*, calcula-se o valor da função nesse ponto, e repete-se o processo, que deve tender a uma das raízes da função rapidamente, ou não tender a nada, deixando isso claro logo. Em notação matemática isso se escreveria assim:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{9}$$

onde n indica a n -ésima iteração do algoritmo e $f'(x_n)$ é a *derivada da função f* em x_n .

Para que se obtenha sucesso na iteração deve-se primeiramente delimitar um intervalo, a fim de escolher um chute inicial adequado, para que a convergência de “ x_n ” seja propícia. Para tanto existem apenas quatro condições a serem satisfeitas:

- O intervalo delimitado deve conter a raiz de $y=f(x)$;
- A função $y=f(x)$ deve ser diferenciável em todo o intervalo;
- A primeira derivada no intervalo não deve trocar de sinal;
- A segunda derivada no intervalo não deve trocar de sinal.

Uma vez delimitado um intervalo que cumpra tais exigências, escolhe-se para o chute-inicial o ponto mais à esquerda se o produto da primeira pela segunda derivada for negativo, ou escolhe-se o ponto mais à direita se ocorrer o contrário, se o produto for positivo.

4 Resultados Experimentais

Para o estudo da queda de tensão e comparativo entre os métodos citados anteriormente foi utilizado, para estudo de caso, o alimentador que atende ao “shopping” Iguatemi. Os cálculos foram feitos através do método do momento de carga e após isto comparados com o cálculo efetuado no ANAREDE.

O alimentador que atende ao “shopping” Iguatemi é o alimentador expresso 01F2PAP sai da SE PAP, esta ligado ao barramento de média tensão 01B1, tem uma extensão de 4,2km o condutor é todo em cabo space de 240mm² o qual suporta uma corrente máxima de 572A tendo $R_1 = 0,1250\Omega/\text{km}$, $X_1 = 0,2408\Omega/\text{km}$, $R_0 = 0,3028\Omega/\text{km}$ e $X_0 = 2,1587\Omega/\text{km}$, conforme mostra a figura 1.

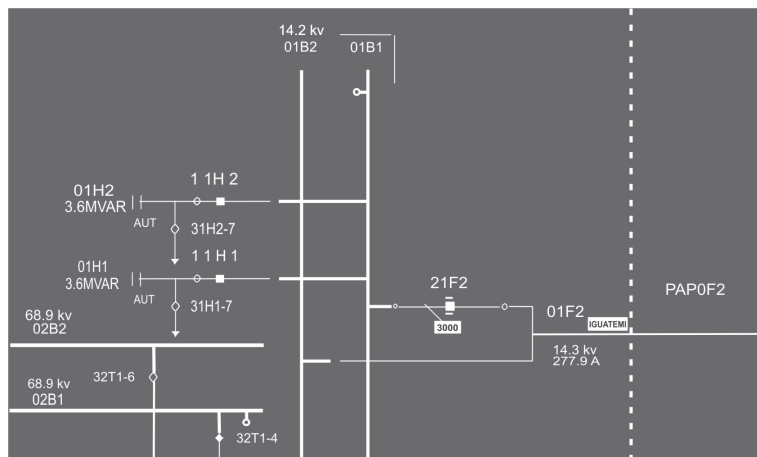


Figura 1: Alimentador 01F2-PAP ligado ao barramento de MT 01B1.

Para os cálculos do momento de carga foi utilizado os dados retirados dos FAU – Ferramenta de Auxílio ao Usuário (SACMT – COELCE), onde na consulta geral foi feito o filtro de modo a ter os dados necessários aos cálculos, onde foram escolhidos três horários diferentes do dia 25 de outubro de 2008, que são considerados críticos: 10 horas da manhã, 6 horas da tarde e 11 horas da noite, nestes horários foram escolhidos os valores de tensão máxima na tabela 1 e maior tensão na tabela 2.

Tabela 1: Tensão no barramento 01B1 da SE-PAP

SE	Data	Hora	BAMT	V [kV]	Vmax [KVmax]	Vmin [KVmin]
PAP	25/10/2008	00:00	15/01B1	13,884	13,971	13,8
PAP	25/10/2008	01:00	15/01B1	13,906	13,955	13,855
PAP	25/10/2008	02:00	15/01B1	13,889	13,932	13,862
PAP	25/10/2008	03:00	15/01B1	13,952	13,994	13,909
PAP	25/10/2008	04:00	15/01B1	13,963	13,994	13,948
PAP	25/10/2008	05:00	15/01B1	13,937	14,01	13,909
PAP	25/10/2008	06:00	15/01B1	14,042	14,095	13,986
PAP	25/10/2008	07:00	15/01B1	14,049	14,095	14,002
PAP	25/10/2008	08:00	15/01B1	14,131	14,203	13,979
PAP	25/10/2008	09:00	15/01B1	14,02	14,165	13,955
PAP	25/10/2008	10:00	15/01B1	13,966	14,025	13,847
PAP	25/10/2008	11:00	15/01B1	13,988	14,056	13,955
PAP	25/10/2008	12:00	15/01B1	14,044	14,072	14,025
PAP	25/10/2008	13:00	15/01B1	14,046	14,118	14,002
PAP	25/10/2008	14:00	15/01B1	13,992	14,056	13,917
PAP	25/10/2008	15:00	15/01B1	13,962	14,002	13,932
PAP	25/10/2008	16:00	15/01B1	14,029	14,103	13,971
PAP	25/10/2008	17:00	15/01B1	14,02	14,095	13,955
PAP	25/10/2008	18:00	15/01B1	13,941	14,079	13,769
PAP	25/10/2008	19:00	15/01B1	14,124	14,18	14,072
PAP	25/10/2008	20:00	15/01B1	14,046	14,134	13,948
PAP	25/10/2008	21:00	15/01B1	14,086	14,141	14,056
PAP	25/10/2008	22:00	15/01B1	14,164	14,266	14,11
PAP	25/10/2008	23:00	15/01B1	13,992	14,11	13,893

Tabela 2: Leitura de tensão no barramento de MT da subestação do Iguatemi

Landis+Gyr Equipamentos de Medição - Programa de Análise de Demanda - PAD Win 4.00.3								
Data: 12/11/2008			Leitora: 511999		Modelo: 1681			
Hora: 15:33:09			Equipamento: 03453523		Versão: 7124			
Relatório da memória de massa								
Reg.	Data	Hora	V a	C1	V b	C2	V c	C3
3576	25/10	10:00	112.6	2252	0	0	113,15	2263
3672	25/10	18:00	110.6	2212	0	0	111,15	2223
3732	25/10	23:00	115.35	2307	0	0	116	2320

Da tabela 1, foram retirados os seguintes valores de tensão máxima ($V_{m\acute{a}x}$) na barra da subestação Papicu às 10:00, 18:00 e 23:00 horas para as mesmas serem utilizadas no cálculo do momento de cargas através das equações (5) e (6) onde é feito a comparação do valor encontrado através dos cálculos com o valor real. Deste modo, encontra-se:

- $V_{o(10)} = 14,025$ kV tensão máxima para o horário de 10:00 horas;
- $V_{o(18)} = 14,079$ kV tensão máxima para o horário de 18:00 horas;
- $V_{o(23)} = 14,110$ kV tensão máxima para o horário de 23:00 horas;

Da tabela 2, foram retirados os valores de tensão (V_c) os quais têm uma RTP de 1/120 e a cada volt registrado no equipamento deve-se multiplicar por 120 para ter a tensão no barramento de MT na subestação Iguatemi às 10:00h, 18:00h e 23:00 horas para as mesmas serem utilizadas no cálculo do momento de cargas através das equações (5) e (6) onde é feito a comparação do valor encontrado através dos cálculos com o valor real. Repetindo o procedimento, encontra-se:

- $V_{1(10)} = 113,15 \times 120 = 13,578$ kV tensão máxima para o horário de 10:00 horas;
- $V_{1(18)} = 115,15 \times 120 = 13,338$ kV tensão máxima para o horário de 18:00 horas;
- $V_{1(23)} = 116,00 \times 120 = 13,920$ kV tensão máxima para o horário de 23:00 horas;

Para a inserção dos parâmetros no ANAREDE (ANAREDE, 2008) foi necessário os cálculos da impedância total do condutor space de 240 mm² “por fase” Z_{Tc} em Ω/km posteriormente foram calculados valores de base na fase para as tensões V_{bF10} no horário de 10h, V_{bF18} no horário de 18h, V_{bF23} no horário de 23h em kV e adotada uma potencia de base S_{bF} em MVA em seguida foi calculado os valores de corrente de base I_{bF10} no horário de 10:00h, I_{bF18} no horário de 18:00h, e I_{bF23} no horário de 23:00h e impedância de base na fase Z_{bF10} para o horário de 10:00h, Z_{bF18} para o horário de 18:00h, Z_{bF23} para o horário de 23:00h, posteriormente adotando-se a fase inicial nula calculo-se as tensões V_{AN10} para o horário de 10h, V_{AN18} para o horário de 18:00h e V_{AN23} para o horário de 23:00h. Após encontrar estes valores foi feito o cálculo das tensões em p.u. sendo $V_{AN10} = V_{AN18} = V_{AN23} = 1 < 0^\circ$, em seguida foi realizado o cálculo das impedâncias em pu Z_{10} para o horário de 10:00h, Z_{18} para o horário de 18:00h e Z_{23} para o horário de 23:00h, e em seguida os cálculos da resistência em pu que são $R_{I(10)}$ para o horário de 10:00h, $R_{I(18)}$ para o horário de 18:00h, $R_{I(23)}$ para o horário de 23:00h e por último os cálculos da reatância em pu onde $X_{I(10)}$ para o horário de 10:00h, $X_{I(18)}$ para o horário de 18:00h, e $X_{I(23)}$ para o horário de 23:00h. Deste modo, efetua-se o cálculo da impedância total do condutor “space” de 240 mm² por fase:

$$Z_{Tc} = I(RI + jXI) \Rightarrow Z = 0,525 + j1,011 \Omega/km \text{ ou } 1,139 \angle 62,56^\circ \Omega/km;$$

Segue-se com os cálculos dos valores de base na fase para as tensões V_{bF10} no horário de 10h, V_{bF18} no horário de 18h, V_{bF23} no horário de 23h:

$$V_{bF10} = \frac{14,025}{\sqrt{3}} = 8,09 kV$$

$$V_{bF18} = \frac{14,079}{\sqrt{3}} = 8,13 kV$$

$$V_{bF23} = \frac{14,110}{\sqrt{3}} = 8,15 kV$$

$$S_{bF} = 12 MVA$$

Segue-se agora os cálculos para as bases de corrente I_{bF10} no horário de 10:00h, I_{bF18} no horário de 18:00h, e I_{bF23} no horário de 23:00h e impedância na fase Z_{bF10} para o horário de 10:00h, Z_{bF18} para o horário de 18:00h, Z_{bF23} para o horário de 23:00h, resultando nos valores:

$$I_{bF10} = \frac{S_{bF}}{V_{bF10}} = 1483,31A$$

$$I_{bF18} = \frac{S_{bF}}{V_{bF18}} = 1476,01A$$

$$I_{bF23} = \frac{S_{bF}}{V_{bF23}} = 1472,39A$$

$$Z_{bF10} = \frac{(V_{bF10})^2}{S_{bF}} = 5,45\Omega$$

$$Z_{bF18} = \frac{(V_{bF18})^2}{S_{bF}} = 5,51\Omega$$

$$Z_{bF23} = \frac{(V_{bF23})^2}{S_{bF}} = 5,55\Omega$$

Finalmente efetua-se o cálculo das tensões adotando-se a fase inicial nula para as tensões V_{AN10} para o horário de 10h, V_{AN18} para o horário de 18:00h e V_{AN23} para o horário de 23:00h.

$$\dot{V}_{AN10} = \frac{V_{bF10}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 8,09 \angle 0^\circ V$$

$$\dot{V}_{AN18} = \frac{V_{bF18}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 8,13 \angle 0^\circ V$$

$$\dot{V}_{AN23} = \frac{V_{bF23}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 8,15 \angle 0^\circ V$$

resultando nos valores em pu V_{AN10} para o horário de 10:00h V_{AN18} para o horário de 18:00h e V_{AN23} para o horário de 23:00h em seguida foi realizado o cálculo das impedâncias em pu Z_{10} para o horário de 10:00h, Z_{18} para o horário de 18:00h e Z_{23} para o horário de 23:00h, e em seguida os cálculos da resistência em pu que são $R_{I(10)}$ para o horário de 10:00h, $R_{I(18)}$ para o horário de 18:00h, $R_{I(23)}$ para o horário de 23:00h e por último os cálculos da reatância em pu onde $X_{I(10)}$ para o horário de 10:00h, $X_{I(18)}$ para o horário de 18:00h, e $X_{I(23)}$ para o horário de 23:00h.

$$\dot{V}_{AN10} = \dot{V}_{AN18} = \dot{V}_{AN23} = \frac{\dot{V}_{AN10}}{V_{bF10}} = \frac{\dot{V}_{AN18}}{V_{bF18}} = \frac{\dot{V}_{AN23}}{V_{bF23}} = 1 \angle 0^\circ pu$$

$$\dot{Z}_{10} = \frac{Z_{Tc}}{Z_{bF10}} = 0,2090 \angle 62,56^\circ pu$$

$$\dot{Z}_{18} = \frac{Z_{Tc}}{Z_{bF18}} = 0,2067 \angle 62,56^\circ pu$$

$$\dot{Z}_{23} = \frac{Z_{Tc}}{Z_{bF23}} = 0,2052 \angle 62,56^\circ pu$$

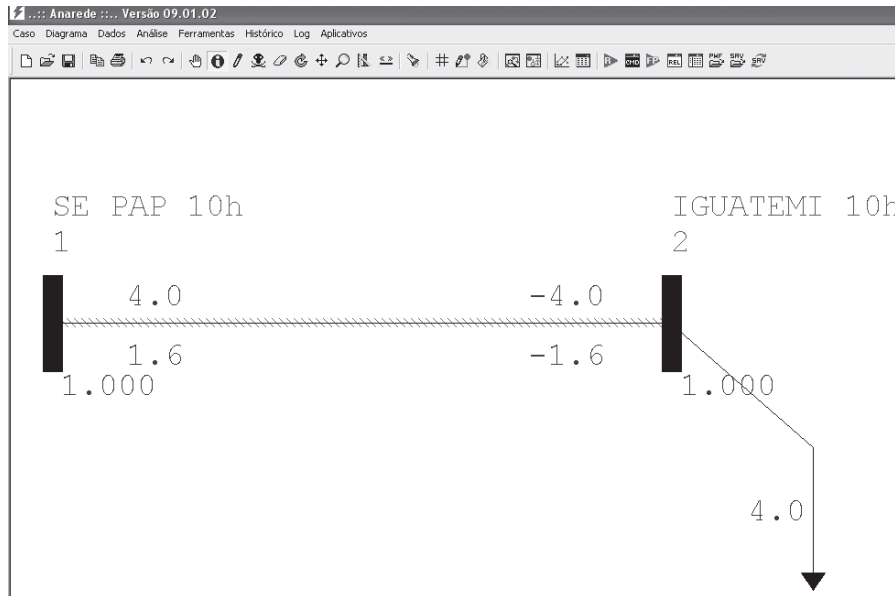


Figura 2: Simulação feita no ANAREDE com todos os parâmetros para o horário de 10:00h

Utilizando a mesma metodologia, agora para o horário das 18:00 do dia 25 de outubro de 2008, encontra-se:

$P = 6,0888 MW$ Potência ativa;

$Q = 2,7595 MVar$ Potência reativa;

$S_T = \sqrt{P^2 + Q^2} \Rightarrow S_T = 6,6849 MVA$ Potência aparente.

$\cos \theta = \frac{P}{S_T} = 0,9108$ fator de potência;

$Arc \cos 0,9108 = 24,3804^\circ$; $\cos 24,3804^\circ = 0,9108$
 $\sin 24,3804^\circ = 0,4128$

$$G = \frac{(0,1250 \times 0,9108) + (0,2408 \times 0,4128)}{14,079 V_1}$$

$$G = \frac{0,0151}{V_1}$$

$$\frac{V_0 - V_1}{V_0} = \frac{0,0151}{V_1} \cdot S_T$$

Neste horário, a queda de tensão existente entre as barras de MT da SE PAP e da SE Iguatemi foi igual a 741 V. Deste modo, a diferença de tensão existente entre o valor estimado utilizando o cálculo de momento de cargas e a tensão existente da barra da SE Iguatemi é de:

$$13,6417 \text{ kV} - 13,3380 \text{ kV} = 303,7 \text{ V.}$$

Do mesmo modo que no caso anterior, o ANAREDE não apresentou queda de tensão para os parâmetros deste horário, como pode ser visto na figura 3:

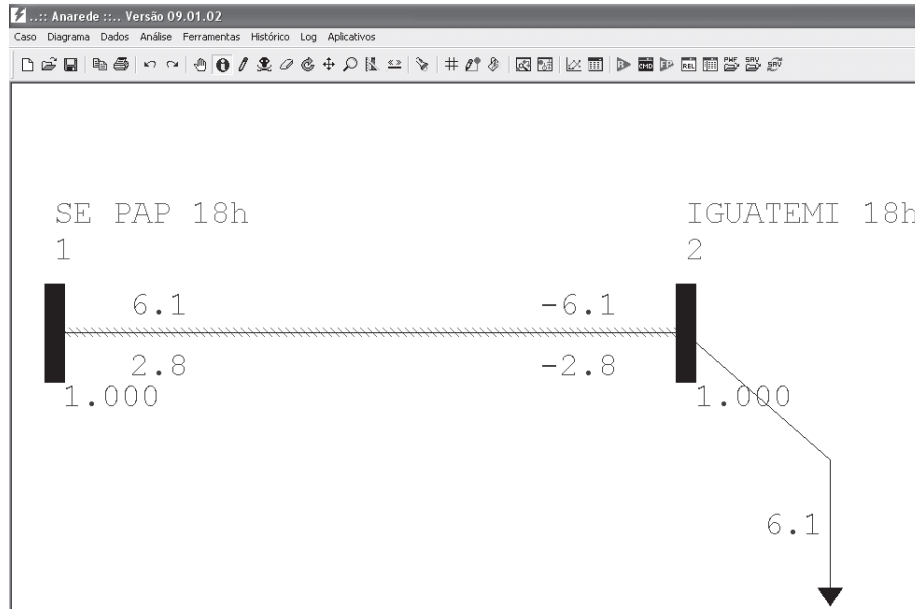


Figura 3: Simulação feita no ANAREDE com todos os parâmetros para o horário de 18:00h

Ainda com o mesmo procedimento, para o horário das 23:00 do dia 25 de outubro de 2008, para o mesmo alimentador:

$$P = 2,0771MW \quad \text{Potência ativa;}$$

$$Q = 1,0044MVar \quad \text{Potência reativa;}$$

$$ST = \sqrt{P^2 + Q^2} \Rightarrow ST = 2,3072MVA \quad \text{Potência aparente.}$$

$$\cos \theta = \frac{P}{ST} = 0,9003 \quad \text{fator de potência;}$$

$$\text{Arc cos } 0,9003 = 25,8075^\circ; \quad \cos 25,8075^\circ = 0,9003; \quad \text{sen } 25,8075^\circ = 0,4353$$

$$G = \frac{(0,1250 \times 0,9003) + (0,2408 \times 0,4353)}{14,110.V_1}$$

$$G = \frac{0,0154}{V_1}$$

$$\frac{V_0 - V_1}{V_0} = \frac{0,0154}{V_1} \cdot I \cdot ST$$

Neste horário, a queda de tensão existente entre as barras de MT da SE PAP e da SE Iguatemi foi igual a 190 V. Deste modo, a diferença de tensão existente entre o valor estimado utilizando o cálculo de momento de cargas e a tensão existente da barra da SE Iguatemi é de:

$$13,9592 \text{ kV} - 13,9200 \text{ kV} = 39,2 \text{ V.}$$

Novamente, o ANAREDE não apresentou queda de tensão para os parâmetros deste horário, como pode ser visto na figura 4:

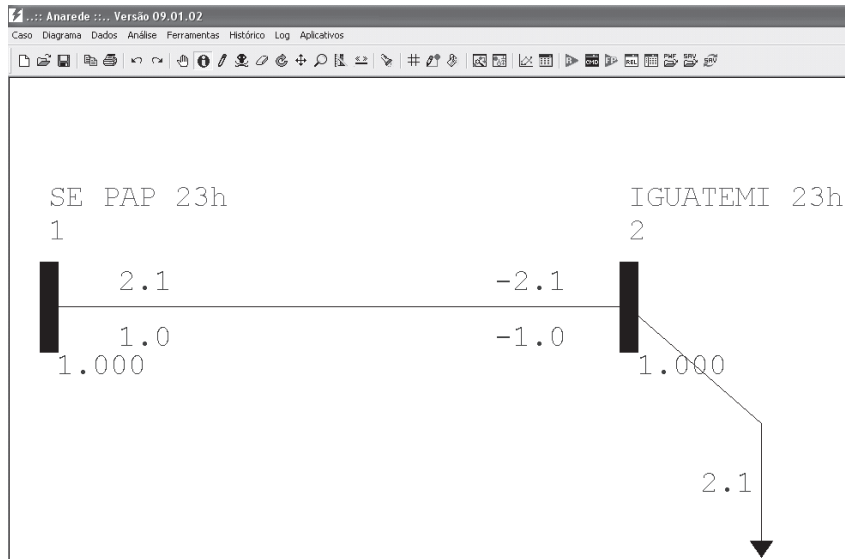


Figura 4: Simulação feita no ANAREDE com todos os parâmetros para o horário de 23:00h

5 Conclusão

A partir dos estudos realizados neste documento conseguiu-se mostrar de forma clara e precisa que o uso do Programa de Análise de Redes – ANAREDE não é aconselhável para o cálculo de queda de tensão em redes de distribuição 13.8kV com cargas desequilibradas, para isto foram feitos cálculos usando o método momentos de carga para determinar a queda de tensão existente entre o barramento de 13,8kV na SE PAP até o barramento de 13,8kV da SE do shopping Iguatemi que é atendido pelo alimentador 01F2-PAP e comparado com o uso do ANAREDE que neste caso utiliza o método de Newton-Rapson (ANAREDE, 2008), onde foi constatado que o Programa de Análise de Rede não converge com isso à queda de tensão calculada pelo programa foi inexistente. O ANAREDE é um programa computacional muito empregado no Brasil em Sistemas Elétricos de Potência. É constituído por um conjunto de aplicações integradas que abrange Análise de Sensibilidade de Tensão e Fluxo, Fluxo de Potência, Equivalente de Redes, Análise de Contingências e Análise de Segurança de Tensão.

6 Referências

- ANAREDE. Programas de análise de rede: ANAREDE V09.02.03: Manual do Usuário, Rio de Janeiro, 2008.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; Robba, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- PINTO, V. A. *Controle de tensão de sistemas de distribuição*. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1985.
- SHORT, T. A. *Electric power distribution equipment and systems*. 2nd ed. Nova York: Taylor and Francis, 2001.

Simbologia

G	Queda tensão unitária	[Ohms/(km*kV)]
P	Potência Ativa	[W]
Q	Potência Reativa	[Ohms]
SE	Subestação	
S_T	Carga total concentrada no extremo do alimentador	[VA]
s''	Densidade superficial de carga	[VA/km ²]
V_0	Tensão no barramento de MT da SE fornecedora	[kV]
V_1	Tensão no barramento de MT da SE do cliente	[kV]
ΔV	Queda de Tensão	[kV]
X	Reatância do condutor	[Ohms]
R	Resistência do condutor	[Ohms]
x	Reatância do condutor por unidade de comprimento	[Ohms/km]
r	Resistência do condutor por unidade de comprimento	[Ohms/km]
δ	Abertura angular do alimentador	[graus]