

Metodologia para Determinação do Modelo de Carga no Sistema COELBA

Carlos F. Ribeiro, Leone N. Conceição, Luiz B. Aguiar e Caiuby A. Costa

RESUMO

Os estudos de fluxo de carga e estabilidade exigem o conhecimento do comportamento da potência ativa e da potência reativa das cargas do sistema a ser estudado de maneira a obter-se resultados mais próximos possíveis da realidade. Com isto pode-se chegar ao dimensionamento correto de dispositivos de regulação de tensão e de compensação de reativos, otimizando-se os investimentos da concessionária.

Portanto, a determinação dos modelos de carga assumem vital importância nas concessionárias modernas, sobretudo em épocas de crise energética ou em emergências com restrição de carga, quando o controle da carga por ajustes na tensão pode significar uma alternativa menos drástica e psicologicamente mais suave do que o corte por rodízio de bairros na área de concessão.

PALAVRAS-CHAVE

Cargas sensíveis à tensão; Controle de carga por ajuste da tensão; Modelo de carga; Restrição de carga; Variação das potências ativa e reativa com a tensão.

I. INTRODUÇÃO

Os métodos utilizados nos estudos de fluxo de carga e estabilidade partiam de hipóteses em que se considerava a potência ativa das cargas constantes e a potência reativa proporcional ao quadrado da tensão. Os resultados obtidos estavam longe da realidade e em muitos casos verificava-se que “o programa não convergia”, mostrando a necessidade de um número maior de linhas entre duas determinadas barras.

Na realidade, tanto a potência ativa como a potência reativa das cargas são funções da tensão, isto é, a depender do tipo de carga, os valores de P e Q são mais ou menos sensíveis às variações de tensão.

Observa-se que os trabalhos até hoje realizados sobre o assunto tiveram dois objetivos distintos:

- a) a determinação do impacto da redução de tensão no consumo e na demanda.
- b) a determinação do modelo de carga adequado aos estudos de fluxo de carga e estabilidade.

Qualquer que seja o objetivo principal, os resultados são diretamente aplicáveis em qualquer caso, uma vez que os coeficientes e parâmetros obtidos são comuns.

Este trabalho foi baseado no projeto de P&D da COELBA [1] onde são apresentados os principais resultados da pesquisa em questão.

II. DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO

Numa determinada subestação, as variações de P e Q com a tensão V, correspondem às variações das diversas cargas individuais combinadas, que podem ser estudadas conforme modelos predeterminados.

A. Modelo Exponencial

O modelo exponencial é expresso analiticamente através das equações:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^m \quad (2)$$

onde P_0 e Q_0 são os valores nominais ou iniciais quando a tensão é mantida no valor V_0 .

Na Figura 1 são mostradas as curvas P(V) para valores de n iguais a 0, 1 e 2. Estas mesmas curvas também representam as funções Q(V) para valores de m correspondentes também a 0, 1 e 2.

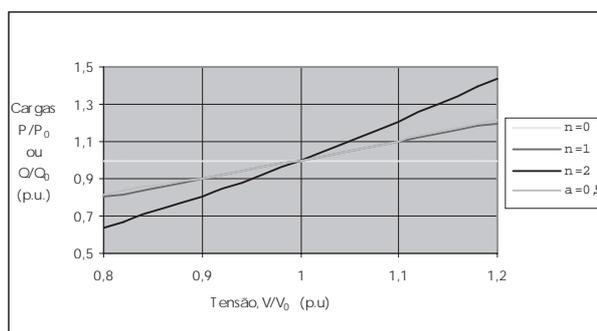


FIGURA 1 - Modelo Exponencial das Cargas Típicas

O tipo de carga é definido como segue:

$n = m = 0$ potência constante ($S = \text{const.}$)

$n = m = 1$ corrente constante ($I = \text{const.}$)

$n = m = 2$ impedância constante ($Z = \text{const.}$)

Os expoentes n e m podem ser determinados através de medições num ponto do sistema elétrico. Para isso, através de variações de V, isto é, para cada valor de ΔQ e ΔP :

Carlos F. Ribeiro trabalha na NORSUL Engenharia e Consultoria Ltda. (e-mail: norsul@cpunet.com.br).

Leone N. Conceição trabalha na COELBA – GOS. (e-mail: lconceicao@coelba.com.br).

Luiz B. Aguiar trabalha na COELBA – GPI (e-mail: lbaguiar@coelba.com.br).

Caiuby A. Costa, Dr. Eng., é Professor da Escola Politécnica da UFBA (e-mail: caiuby@ufba.br).

$$V = V_0 + \Delta V \quad (3)$$

$$P = P_0 + \Delta P \quad (4)$$

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (5)$$

As equações acima podem ser modificadas de maneira que

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \frac{\Delta V}{V_0} \quad (6)$$

$$\frac{P}{P_0} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (7)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{\Delta Q}{Q_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^m \quad (8)$$

Aplicando logaritmos às expressões acima vem

$$\log \frac{V}{V_0} = \log \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right) \quad (9)$$

$$\log \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0}\right) = n \log \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (10)$$

$$\log \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_0}\right) = m \log \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (11)$$

Tirando os valores de n e m ,

$$n = \frac{\log \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0}\right)}{\log \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)} \quad (12)$$

$$m = \frac{\log \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_0}\right)}{\log \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)} \quad (13)$$

Para pequenas variações de ΔQ , ΔP e ΔV são válidas as expressões

$$n \cong \frac{\frac{\Delta P}{P_0}}{\frac{\Delta V}{V_0}} = \frac{\% \Delta P}{\% \Delta V} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (p.u.) \quad (14)$$

$$m \cong \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0}}{\frac{\Delta V}{V_0}} = \frac{\% \Delta Q}{\% \Delta V} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (p.u.) \quad (15)$$

As expressões de n e m são também dadas sob a forma

$$n = \frac{DP}{DV} \quad (16)$$

$$m = \frac{DQ}{DV} \quad (17)$$

Por outro lado, partindo-se da expressão

$$S = P + jQ, \quad (18)$$

pode-se representar a carga complexa tomando-se parte dela com o expoente zero (potência constante) e parte com expoente 2 (impedância constante) conforme um fator de distribuição [2]:

$$S = (1-\alpha)S_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^0 + \alpha S_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2, \quad (19)$$

isto é,

$$S = (1-\alpha)S_0 + \alpha S_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (20)$$

Esta última expressão aplicada à potência ativa torna-se

$$P = (1-\alpha)P_0 + \alpha P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (21)$$

ou

$$\frac{P}{P_0} = (1-\alpha) + \alpha \left(\frac{V}{V_0}\right)^2, \quad (22)$$

conforme representada também na figura 1, para $\alpha=0,5$.

B. Variações em degraus

Com base nas variações de ΔV nos diversos “taps” e correspondentes valores medidos de ΔP e ΔQ , são medidos os valores de n e m conforme segue:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} (p.u.) = \frac{P_a - P_d}{V_a - V_d} = \frac{DP}{DV} \quad (23)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} (p.u.) = \frac{Q_a - Q_d}{V_a - V_d} = \frac{DQ}{DV} \quad (24)$$

onde o índice a representa os valores antes da mudança de “taps” e o índice d se refere aos valores depois da mudança de “taps”.

É claro que, para variações discretas de ΔV , ΔP e ΔQ , os resultados devem ser iguais aos obtidos através do modelo exponencial, conforme (14) e (15).

C. Declividade das Curvas Ajustadas

Tendo-se medidos os valores de P e Q com a tensão V nos diversos “taps”, pode-se ajustar as curvas polinomiais de $P(V)$ e $Q(V)$ e calcular as derivadas $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ nos pontos de mudança de “taps” em MW/kV e Mvar/kV, de modo a obter-se

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\partial}{\partial V} P(V) \quad (\text{MW/kV}) \quad (25)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\partial}{\partial V} Q(V) \quad (\text{Mvar/kV}) \quad (26)$$

Este método indicou valores de $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ coerentes com a maioria dos resultados obtidos das pesquisas mencionadas neste relatório, sendo usados quando em emergências se deseja controlar as cargas através do ajuste da tensão.

Quando os diversos pontos de P e Q se encontram próximos das curvas ajustadas, os valores de $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ em MW/kV e Mvar/kV tendem a se aproximar dos valores de n e m quando expressos nas mesmas bases obtidos pelos outros dois métodos.

Porém quando os valores mencionados se encontram muito afastados das curvas ajustadas, os valores de $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ são menores que os valores de n e m determinados pelos outros dois métodos.

Como as curvas de $P(V)$ e $Q(V)$ são expressas em MW e Mvar trifásicos, os valores de MW/kV e Mvar/kV são referidos as tensões compostas (fase-fase).

Antes de ocorrerem as privatizações no Reino Unido, o British Electricity Council emitiu instruções através do Central Electricity Generation Board – CEGB para todas as distribuidoras, no sentido de se realizar o controle da carga sob ajustes na tensão, no caso de emergências e saídas forçadas de geradores no sistema. Foram utilizados os coeficientes de MW/kV e Mvar/kV nas diversas áreas do sistema elétrico interligado com grande sucesso.

III. COMPOSIÇÃO DAS CARGAS REAIS DO SISTEMA NOS MODELOS CONSIDERADOS

Qualquer carga no sistema deve ser investigada através de medições, sendo que a partir daí pode-se determinar a sensibilidade da mesma sob variações de tensão. Torna-se praticamente impossível saber-se a priori a composição da carga segundo os modelos aqui definidos sem uma pesquisa de campo.

As principais cargas podem ser classificadas segundo os modelos de potência constante, impedância constante e corrente constante conforme segue.

A. Cargas de Potência Constante

Este modelo é também chamado de “MVA constante” ou “kVA constante”. A característica básica de uma carga deste tipo é que, sob redução de tensão no sistema a corrente aumenta e se a tensão se eleva, a corrente se reduz.

Usualmente, na maioria dos estudos, consideram-se inseridos neste grupo, os motores de indução operando próximos ou à plena carga e motores síncronos operando sob um fator de potência unitário, uma vez que não há mudança substancial de velocidade dos mesmos quando ocorrem variações de tensão [1].

As “voltage sags” devidas à partida de um motor de grande potência são mais severas na presença de cargas de potência constante, do que com cargas de impedância constante ou de corrente constante. Assim, o uso indiscriminado de cargas com modelo de potência constante em estudos de estabilidade podem indicar uma falsa instabilidade.

B. Cargas de Impedância Constante

Este tipo de carga consiste de impedâncias ligadas em derivação, tais como, resistores, aquecedores, iluminação, reatores, capacitores para correção do fator de potência e motores levemente carregados. A impedância destas cargas permanece constante durante todas as condições de tensão no sistema. Deve ser lembrado que motores de indução e síncronos são considerados também como

impedância constante no instante da partida.

A maioria das cargas de impedância constante são consideradas como sendo resistências – indutâncias em série, isto é, circuitos RL.

C. Cargas de Corrente Constante

As cargas de corrente constante absorvem a corrente do sistema sob quaisquer condições de tensão que ocorrem no mesmo. Estas cargas consomem potência aparente maior quando o nível de tensão se eleva e consomem menos MVA quando a tensão se reduz. Assim, o consumo em MVA é proporcional à tensão aplicada à carga.

Este modelo de carga é aproximadamente equivalente a 50% de carga de potência constante e 50% de carga de impedância constante. A maioria dos prédios comerciais se aproxima bastante deste modelo, pois suas cargas consistem de iluminação, ar condicionado e motores em iguais proporções.

Um sistema que contém motores próximos à plena carga e motores levemente carregados tende a absorver aproximadamente corrente constante, pois uma redução eventual da tensão causa a redução de corrente nos motores com baixas cargas e um aumento de corrente nos motores mais carregados. Os acionamentos de velocidade variável são também classificados neste modelo.

A referência [3] oferece resultados na maioria do Sistema CHESF, além de simulações para P constante e Z contante.

Cumpra observar que os valores de $\frac{DP}{DV}$, $\frac{DQ}{DV}$, n , m , $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ sejam em p.u. ou em MW/kV e Mvar/kV, se referem a características intrínsecas da carga. Em outras palavras, se esta carga for suprida a partir de qualquer outro ponto do sistema, ela se comporta exatamente da maneira anterior quando ocorrem variações de tensão.

Os valores de e e f são coeficientes de sensibilidade da carga, não devendo ser confundidos com os de rigidez ou de sensibilidade num ponto do sistema.

IV. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

- a) Unidade de processamento digital de variáveis elétricas UPD – 600 Yokogawa
 - Entradas CA
 - Tensão 0 a 600 V
 - Corrente 0 a 7,5 A
 - Circuitos monofásicos 2 e 3 fios
 - Circuitos trifásicos 3 a 4 fios, medidores e 2, 2 $\frac{1}{2}$ e 3 elementos
 - Entradas e saídas especiais
 - Duas entradas analógicas de 0 a 20 mA CC
 - Quatro entradas digitais, contato ou nível TTL
 - Duas saídas digitais, coletor aberto
- b) Interface RS 485
 - Duas saídas independentes
 - Protocolo Modbus RTU
- c) Memória interna
 - Intervalo de armazenamento 1 a 7200 s

V. PONTOS DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas em disjuntores gerais de saída das subestações com as seguintes faixas de degraus:

- Subestação de Barreiras 16.5/4% (+5% -15%), comutação secundária.
- Subestação Central, 16.5/4% (±10%), comutação secundária.
- Subestação Federação 32.5/8% (±10%), comutação secundária.
- Subestação Lauro de Freitas 16.5/4% (+5% -15%), comutação primária.
- Subestação Pituba 32.5/8% (±10%), comutação primária.
- Subestação Rio das Pedras 16.5/4% (+5% -15%), comutação primária.
- Subestação São Cristóvão 32.5/8% (±10%), comutação primária.

As cargas supridas por estas subestações são basicamente residenciais e comerciais com predominância da classe residencial em Barreiras, Federação, Lauro de Freitas, Pituba e São Cristóvão.

A subestação Central tem predominância de carga comercial e a de Rio das Pedras alimenta cargas mistas de irrigação e industrial.

VI. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

As tabelas 1 e 2 a seguir resumem os resultados encontrados para os coeficientes de sensibilidade nas subestações em diferentes dias, mostrando os valores médios juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação das medições.

TABELA 1

RESUMO DOS RESULTADOS – CARGA ATIVA

SE	∂P/∂V			DP/DV			n		
	Méd.	σ	CV	Méd.	σ	CV	Méd.	σ	CV
Barreiras	0,22	0,04	0,19	0,83	0,24	0,29	0,83	0,24	0,29
Central	0,63	0,09	0,15	0,81	0,24	0,29	0,81	0,24	0,29
Central	1,02	0,17	0,17	0,75	0,41	0,55	0,75	0,41	0,55
Central	0,75	0,22	0,30	0,87	0,33	0,38	0,87	0,33	0,38
Central	0,89	0,08	0,09	0,86	0,19	0,22	0,86	0,19	0,22
Central	0,74	0,25	0,33	0,61	0,35	0,57	0,61	0,35	0,57
Central	1,07	0,09	0,08	1,02	0,64	0,63	1,02	0,64	0,63
Central	0,87	0,32	0,36	0,68	0,17	0,25	0,68	0,17	0,25
Federação	0,48	0,28	0,58	1,20	0,90	0,75	1,19	0,89	0,75
Federação	0,93	0,21	0,23	1,48	1,15	0,77	1,48	1,14	0,77
Federação	0,39	0,12	0,30	1,08	0,76	0,70	1,08	0,76	0,70
L. de Freitas	0,67	0,29	0,43	0,76	0,34	0,45	0,76	0,34	0,45
L. de Freitas	0,52	0,01	0,02	0,63	0,29	0,45	0,63	0,29	0,45
Pituba	0,88	0,16	0,18	0,99	0,70	0,71	0,99	0,70	0,71
Pituba	1,14	0,26	0,22	1,15	0,42	0,36	1,15	0,42	0,36
R. das Pedras	0,07	0,02	0,38	0,89	0,36	0,41	0,89	0,36	0,41
S. Cristóvão	0,60	0,35	0,58	1,37	0,89	0,65	1,37	0,88	0,65
S. Cristóvão	1,02	0,23	0,23	2,91	3,69	1,27	2,91	3,67	1,26

Deve ser observado que as equações polinomiais de P(V) e Q(V) somente são válidas dentro dos limites de variação da tensão aplicada às cargas, isto é, correspondentes as características estáticas das mesmas. Por exemplo, no caso de um curto-circuito, V=0 e portanto, os valores de P e Q resultantes não tem significado físico.

A título de exemplo são mostrados a seguir as funções polinomiais da SE Lauro de Freitas mostradas nas figuras 2 e 3 a seguir.

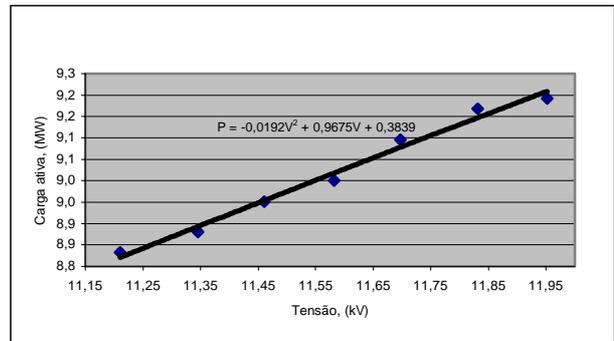


FIGURA 2 - Modelagem de Carga Ativa - SE Lauro de Freitas

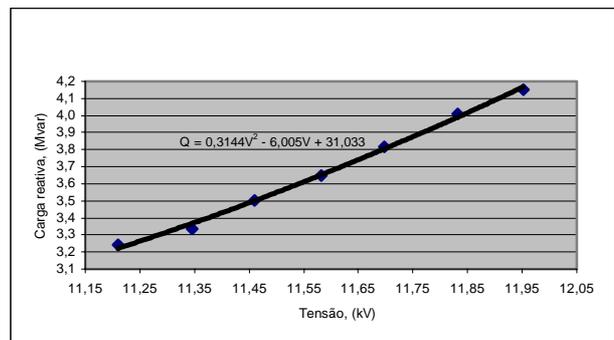


FIGURA 3 - Modelagem de Carga Reativa - SE Lauro de Freitas

VII. CONCLUSÕES

De referência às medições nas diversas subestações, cumpre observar os seguintes comentários:

- a) as medições realizadas durante as horas de crescimento ou redução acentuadas das cargas apresentam valores com maiores discrepâncias em relação aos resultados apresentados em pesquisas internacionais, bem assim, relativamente a medições realizadas quando a carga era praticamente constante (“flat”).
- b) as medições efetuadas com a instrumentação ajustada pra um intervalo de integralização de um segundo apresentaram grandes oscilações em relação as medições realizadas com um intervalo de integralização de 30 segundos. Isto se deve em parte a variações instantâneas da própria carga e de outro lado, à ressonâncias parciais nos circuitos R, L e C do sistema. Por esta razão, foi calculada a mediana dos valores medidos nos degraus onde o intervalo de integralização foi de um segundo, tendo sido utilizados nas tabelas os referidos valores calculados.

- c) em alguns casos, observam-se discrepâncias entre as medições onde o valor do degrau era de 5/8% e aquelas onde o degrau era de 5/4%. Isto pode ser explicado, porque as variações da carga com degraus de 5/8% apresentam maiores oscilações do que com degraus de 5/4%.
- d) chamou atenção o fato de em algumas subestações a curva de $P(V)$ ter apresentado a concavidade voltada para baixo, ao contrário da maioria. Estes casos podem ocorrer a depender da forma do crescimento ou redução da carga, aliados aos intervalos de registro dos dados. Na referência [4] observa-se o mesmo fenômeno ocorrido na subestação de Laurent no Canadá.
- e) os valores calculados para $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial Q}{\partial V}$ são sempre menores do que os coeficientes $\frac{DP}{DV}$, $\frac{DQ}{DV}$, n e m , tendo em vista que as unidades adotadas foram MW/kV e Mvar/kV.
- f) observa-se que a dispersão dos valores medidos em relação às polinomiais ajustadas estatisticamente, são maiores nas curvas $P(V)$ que nas curvas $Q(V)$, uma vez que as variações de carga ativa fogem totalmente ao controle das concessionárias, tornando mais sensíveis as variações de $P(V)$ com a tensão aplicada.
- g) à medida que as medições realizadas foram feitas com saltos maiores, partindo-se de 1, 2, 3, e 4 taps, as diferenças entre os valores calculados de $\frac{DQ}{DV}$ e m se tornaram também maiores, conforme previsto, de acordo com (14) e (15). Assim, quanto maiores forem as variações na tensão, mais afastados serão os valores de $\frac{DQ}{DV}$ e m frente aos citados valores.
- h) observou-se na Subestação Rio das Pedras, que supre cargas de irrigação e industriais, baixos valores para os coeficientes $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{DP}{DV}$ e n , em confronto com os valores elevados de $\frac{DQ}{DV}$ e m , confirmando a existência de motores de indução em grande quantidade, influenciando os resultados. Além disso, observam-se ligeiras discrepâncias entre os coeficientes $\frac{DQ}{DV}$ e m , resultantes da inércia de estabilização das cargas sob variações provocadas na tensão.
- i) os dispositivos e equipamentos elétricos dotados de núcleo magnético e respectivos enrolamentos, reagem frente a fenômenos de magneto-estricção, ressonâncias parciais dos circuitos R, L e C e outros, analogicamente a sistemas mecânicos compostos de massa, mola e amortecimento, dando origem a oscilações, que causam efeitos espúrios nos aparelhos de medição, dificultando a interpretação dos resultados.
- j) em vista das observações do item anterior, a aparelhagem de medição tem que ser imune aos citados fenômenos, devendo ser dotadas de dispositivos de compensação, capazes de proporcionar inércia eletromagnética, a

fim de eliminar os efeitos secundários que causam ruídos indesejáveis nos registros. Espera-se que em futuro próximo, sejam desenvolvidos equipamentos de medição capazes de proporcionar resultados mais próximos da realidade.

- k) recomenda-se nos estudos de fluxo de carga, a utilização dos valores médios dos coeficientes $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial Q}{\partial V}$, $\frac{DP}{DV}$, $\frac{DQ}{DV}$, n e m nas tabelas.
- l) finalmente, deve ser registrado que esta pesquisa foi levada a cabo no período de extrema restrição de carga de todo sistema elétrico nacional, devendo ser validada nos próximos 2 a 3 anos, com metodologia já dominada, objetivando um melhor ajuste nos resultados.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COELBA – Metodologia para Determinação do Modelo de Carga no Sistema COELBA, Projeto de P&D, 2º Ciclo, 2002.
2. Funk, G. – The Voltage Dependence of Three-phase Loads, Third Power Systems Computation Conference, PSCC Proceedings, Rome 23-27, 1969.
3. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF – Modelagem da Carga com a Tensão, Relatório RT – DOEL – 11/79.
4. Panneton, J. G. e Robichaud, Y. – Study on Load Behavior Within the Hydro – Québec System, Institut de Recherche de l' Hydro – Québec, IREQ, October, 1972.