



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCE 13
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIV
GRUPO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCE**

**PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROJETOS DE
EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Alexandre Gomes Amendola *

Marcelo Augusto Nunes Lima

Daianny Barreto M. da Rocha

BOA VISTA ENERGIA

BOA VISTA ENERGIA

BOA VISTA ENERGIA

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia para realizar a separação das parcelas do investimento devido à eficiência energética e à expansão, contidas num determinado projeto de obra .

O texto apresenta uma relação chamada de “REL” que é uma função dos índices de perdas de potência antes e depois da implementação do projeto e da taxa de crescimento do mercado de energia elétrica . Desta forma, o Órgão Regulador e as Empresas passam a dispor de uma ferramenta capaz de desagregar as parcelas do investimento que são imputáveis à eficiência energética e à expansão dos sistemas . Isso permite estabelecer quais são os valores de investimentos realmente destinados à eficiência, sendo apenas estes, passíveis de cobrança via tarifa . Ao final, são apresentados exemplos reais de aplicação da metodologia proposta .

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência energética, investimentos, expansão, combate ao desperdício

1.0 - INTRODUÇÃO

Os contratos de concessão firmados pelas Concessionárias de Distribuição com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabelecem um conjunto de obrigações e encargos perante o poder concedente .

Com o objetivo de desenvolver, promover e estimular a eficiência energética em projetos de obras de redes de Distribuição, uma destas obrigações consiste na aplicação de um percentual mínimo, hoje fixado em 0,25%, da receita operacional líquida – ROL em ações que visem o combate ao desperdício de energia elétrica .

Para cumprimento desta obrigação, as Concessionárias devem apresentar à ANEEL, em data estabelecida nos respectivos contratos de concessão, um conjunto de projetos que compreenderão o seu Programa Anual de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, que deve conter metas físicas e financeiras, desde que observadas as diretrizes estabelecidas para a sua elaboração . Se os projetos, após análise específica, são aprovados integralmente, o referido percentual pode ser cobrado via tarifa dos consumidores finais . As diretrizes para elaboração dos Programas são aquelas definidas na Lei 9.991, de 24 de julho de 2000, posteriormente atualizada pela Resolução ANEEL 394, de 17/09/2001 .

No lado da oferta, por exemplo, muitos projetos apresentados estão dirigidos para redução dos índices de perdas considerados após a entrada em operação do projeto submetido para aprovação . Ocorre que, com raríssimas exceções, os projetos de obras em sistemas de Distribuição não são destinados, exclusivamente, para reduzir

perdas . Em realidade, nestes projetos, há que se considerar uma parcela do investimento para expansão do sistema com o correspondente aumento da capacidade de transporte das redes e/ou instalações .

O texto apresenta uma relação chamada de "REL" que é uma função dos índices de perdas de potência antes e depois da implementação do projeto e da taxa de crescimento do mercado de energia elétrica .Com isso, o Órgão Regulador e as Empresa passam a dispor de uma ferramenta capaz de desagregar as parcelas do investimento que são imputáveis à eficiência energética e à expansão dos sistemas . Isso permite estabelecer quais são os valores de investimentos realmente destinados à eficiência, sendo apenas estes, passíveis de cobrança via tarifa .

2.0 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os planos de expansão mais elaborados em sistemas de Distribuição são estabelecidos com base em estudos que consideram a situação técnico-operacional dos sistemas existentes, o crescimento do mercado a ser atendido dentro de um horizonte de planejamento, a relatividade de custos (de investimentos, de perdas e da energia não distribuída) e os critérios de planejamento/operação adotados . Estes planos são, dessa forma, resultantes de estudos de simulação que definem a solução técnica de menor custo global envolvendo, como dito, os custos de investimentos, custo das perdas e da energia não distribuída, sujeita à restrições de carregamento e queda de tensão máxima . O resultado destes estudos são, fundamentalmente, o detalhamento das instalações físicas, nível de investimentos com os correspondentes parâmetros operacionais, tais como perdas e duração de interrupções .

No entanto, nem sempre as soluções de menor custo global são as adotadas, pois a ocorrência de restrições financeiras pode levar, por exemplo, o relaxamento dos critérios pré-definidos . Nesta situação, o sistema é levado a adotar uma expansão não otimizada . Assim sendo, a redução das perdas elétricas está embutida dentro da expansão de médio e longo prazos e é, apenas, um dos resultados destes estudos levando à maior economicidade global possível . Tratar-se da redução das perdas dentro de uma visão unilateral de curto prazo pode implicar a custos maiores no médio e longo prazos . Considerando a vida útil as instalações de Distribuição (25/30 anos), há que se levar em conta que, qualquer decisão sobre investimentos para redução de perdas em um certo segmento, dissociada da visão de médio/longo prazos pode comprometer a evolução mais econômica desse segmento no futuro, pois essa é influenciada por aquela decisão .

Além disso, há de se observar que todo o projeto de redução de perdas no sistema provoca, também, uma expansão, salvo algumas exceções (por exemplo, ações em conexões) . Primeiro, porque não tem sentido atuar-se em perdas imaginando-se um mercado estático, quando ele é dinâmico (sobretudo no Brasil) e segundo pelas próprias indivisibilidades das capacidades, em MVA, das obras, que levam a uma inevitável expansão .

Assim, para efeito do presente trabalho, e, de acordo com as premissas regulatórias estabelecidas pela ANEEL, a questão da redução das perdas é tratada como um problema de expansão, procurando estimar a parcela do investimento imputável ao ganho de eficiência . Este ganho, considerando o mercado crescente, não significa, necessariamente, a redução do nível de perdas em kW ; será expresso pelo ganho nos índices de perdas, que expressam com mais precisão a produtividade dos meios de Distribuição de energia elétrica .

Face às múltiplas situações possíveis, a definição de uma formulação geral, certamente, não é tarefa fácil. Para atingir o objetivo principal, foram assumidas simplificações propositais, que espera-se não invalidem o modelo desenvolvido .

3.0 - OUTRAS HIPÓTESES ADOTADAS

Os investimentos em Transmissão/Distribuição são voltados para o incremento da capacidade . Assim, a abordagem deve ser feita com relação às demandas máximas (pontas) dos segmentos considerados . A consideração, também, da energia (no caso da Transmissão/Distribuição) é feita para avaliar-se os benefícios na análise da economicidade de projetos, o que não é o caso presente .

Reconhece-se como ocorrência de incremento da eficiência em um segmento do sistema elétrico em decorrência da implantação de um projeto / programa, se, no ano seguinte à data de entrada em operação do projeto, considerando um mercado de energia elétrica crescente, o índice de perdas de potência no segmento for menor que o índice de perdas no segmento imediatamente anterior à implantação do projeto / programa .

Caso os respectivos índices nestes anos sejam iguais e admitindo mercado crescente, estamos denominando "expansão sem incremento de eficiência", ou, "expansão pura" .Caso o índice de perdas do segmento, após a entrada em operação do projeto e/ou programa, for menor que o do ano anterior, com mercado crescente, considera-se que houve "expansão com incremento de eficiência" . Apenas este caso será contemplado pois houve ganho de eficiência .

Como a expansão normalmente procura minimizar uma função de custo global envolvendo custo do investimento, custo das perdas e custos das interrupções sujeita a restrições de tensão e de carregamento, é possível que para

certos casos, o índice de perdas após a expansão possa aumentar . Estes casos, também, não serão contemplados, pois não houve ganho de eficiência . Os sistema estava operando anteriormente com folgas .

O custo marginal de capacidade (no nível) de se poupar 1 kW na ponta é numericamente igual ao custo marginal de expansão (no nível) pelo incremento de 1 kW na ponta deste nível .

4.0 - FORMULAÇÃO PROPOSTA

Em uma expansão com incremento de eficiência, poder-se-ia identificar, então, duas parcelas : o investimento devido à expansão pura e o investimento para ganho de eficiência, ambos conforme as definições mencionadas no item anterior, que, somados, resultam num investimento global do projeto / programa relativo à expansão com incremento de eficiência .

Há de se observar, no entanto, que o acréscimo da carga atendida pela expansão com incremento de eficiência é menor que o acréscimo da carga relativa à expansão pura, pois, no primeiro, há o efeito do decréscimo da carga provocado pelo ganho de eficiência .

Ao longo do texto, serão adotadas a seguintes definições :

- M_0 = demanda máxima coincidente entregue aos consumidores no ano anterior ao projeto (kW)
- g = taxa anual de crescimento geométrico do mercado de energia elétrica atendido pelo segmento onde se insere o projeto, ou seja, $M_1 = M_0 \times (1+g)$
- ΔM_1 = acréscimo de demanda coincidente no primeiro ano ($M_1 - M_0$)
- Ip_0 = índice de perdas de potência no ano anterior à implantação do projeto (%)
- Ip_1 = índice de perdas de potência no ano seguinte à implantação do projeto (%)
- ΔC_1 = acréscimo de carga devido à expansão pura (kW)
- ΔL_1 = decréscimo de carga devido ao ganho de perdas (kW)
- EXP = parcela do investimento imputável à expansão pura (R\$)
- GEFIC = parcela do investimento imputável ao ganho de perdas (R\$)
- CMG_{exp} = custo marginal de expansão devido à expansão pura (R\$/kW)
- CMG_{gefic} = custo marginal de expansão devido ao ganho de eficiência (R\$/kW)
- I_{global} = investimento global do projeto /programa considerado (R\$)

Como consequência das definições acima, teremos :

EXP + GEFIC = investimento global envolvendo a expansão com ganho de eficiência
 $\Delta C_1 - \Delta L_1$ = acréscimo de carga imputada à expansão com ganho de eficiência

Pela própria definição de custo marginal, teremos :

$$EXP = CMG_{exp} \times \Delta C_1 \quad \text{e, ainda,} \quad GEFIC = CMG_{gefic} \times \Delta L_1$$

Desta forma, o investimento global do projeto será : $I_{global} = CMG_{exp} \times \Delta C_1 + CMG_{gefic} \times \Delta L_1$.

Pela própria definição acima, a parcela ΔC_1 pode ser caracterizada como o incremento de carga no primeiro ano, mantendo o mesmo nível de perdas antes da implementação do projeto/programa . Ou seja : :

$$\Delta C_1 = \frac{\Delta M_1}{(1 - Ip_0)} = \frac{M_1 - M_0}{(1 - Ip_0)} \quad (1)$$

De forma semelhante, a parcela ΔL_1 pode ser caracterizada como ganho de perdas de potência no primeiro ano de operação do projeto devido ao incremento de eficiência . Ou seja : :

$$\Delta L_1 = \frac{M_1}{(1 - Ip_0)} - \frac{M_1}{(1 - Ip_1)} \quad (2)$$

Definindo-se, agora, o termo REL como sendo a participação do investimento devido ao incremento de eficiência no investimento global do projeto, teremos :

$$REL = \frac{CMG_{gefic} \times \Delta L_1}{CMG_{exp} \times \Delta C_1 + CMG_{gefic} \times \Delta L_1} \times 100 \quad (3)$$

Dividindo-se tudo por $CMG_{gefic} \times DL_1$, teremos :

$$REL = \frac{1}{\frac{CMG_{exp} \times \Delta C_1}{CMG_{gefic} \times \Delta L_1} + 1} \times 100 = \frac{1}{\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}} \times \frac{\Delta C_1}{\Delta L_1} + 1} \times 100 \quad (4)$$

Substituindo-se as equações (1) e (2) em (4), teremos, para REL :

$$REL = \frac{1}{\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}} \times \frac{M_1 - M_0}{(1 - Ip_0)} / \left(\frac{M_1}{(1 - Ip_0)} - \frac{M_1}{(1 - Ip_1)} \right) + 1} \times 100$$

$$REL = \frac{1}{\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}} \times \frac{M_1 - M_0}{(1 - Ip_0)} / \left(\frac{M_1 (Ip_0 - Ip_1)}{(1 - Ip_0) \times (1 - Ip_1)} \right) + 1} \times 100 \quad (5)$$

$$REL = \frac{1}{\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}} \times \frac{M_1 - M_0}{(1 - Ip_0)} \times \left(\frac{(1 - Ip_0) \times (1 - Ip_1)}{M_1 (Ip_0 - Ip_1)} \right) + 1} \times 100$$

Mas, $M_1 = M_0 \cdot (1 + g)$. Substituindo-se em (5) acima, teremos :

$$REL = \frac{1}{\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}} \times \frac{g}{1 + g} \times \left(\frac{1 - Ip_1}{Ip_0 - Ip_1} \right) + 1} \times 100 \quad (6)$$

5.0 - DETERMINAÇÃO DA RAZÃO $\frac{CMG_{exp}}{CMG_{gefic}}$

Seja um segmento qualquer do sistema de potência, traduzido pelo diagrama de controle da Figura 1, a seguir :

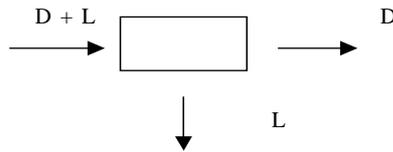


FIGURA 1 – Diagrama Inicial

onde D é a demanda máxima atendida pelo segmento e L corresponde às perdas de potência, ambos expressos em R\$/ kW . Podemos escrever para as perdas :

$$L = a + b.D^2 \quad (7)$$

Onde “a” corresponde às perdas em vazio e “b” é a constante de perdas em carga . Também podemos escrever :

$$D + L = a + b.D^2 + D \quad (8)$$

E o índice anual de perdas de potência será :

$$Ip_o = \frac{L}{D + L} \quad (9)$$

5.1 Determinação Do Custo Marginal Da Expansão Pura

Seja o mesmo segmento anterior, porém com demanda incrementada de 1 kW, com novas perdas, traduzidas por "x", conforme Figura 2, a seguir :

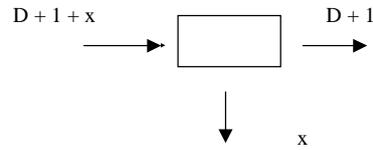


FIGURA 2 – Diagrama Para Custo Marginal da Expansão Pura

E novo índice anual de perdas de potência será :

$$Ip_1 = \frac{x}{D+1+x} \quad (10)$$

Na hipótese da expansão pura, teremos $Ip_0 = Ip_1$, ou seja :

$$\frac{L}{D+L} = \frac{x}{D+1+x} \quad (11)$$

$$\frac{L}{D+L} = \frac{x}{D+1+x}$$

$$x = L \cdot \frac{D+1}{D} = (a + bD^2) \cdot \frac{D+1}{D} = a + \frac{a}{D} + bD^2 + bD$$

Logo,

$$D+1+x = D+1+a + \frac{a}{D} + bD^2 + bD \quad (12)$$

Fazendo-se a subtração das expressões anteriores, tem-se o incremento de demanda requisitada aos sistemas a montante - ΔC , e que explicam a quantidade de obras a ser feita no segmento considerado em função da expansão pura de 1 kW . Ou seja :

$$\Delta C = D+1+a + \frac{a}{D} + bD^2 + bD - (a + bD^2 + D)$$

$$\Delta C = 1 + \frac{a}{D} + bD \quad (13)$$

Evidentemente, nas partes do sistema elétrico em que não existem componentes com perdas em vazio, $a = 0$, o que resulta em :

$$\Delta C = 1 + bD \quad (14)$$

Nos segmentos onde existem componentes com perdas em vazio, a relação entre a e bD^2 vai depender do carregamento do citado segmento . Como, em geral, a execução de projetos que vislumbrem um ganho de eficiência é recomendável naqueles segmentos mais carregados, isto é, com maior índice de perdas globais, estimou-se como limite máximo a seguinte relação :

$$\frac{a}{bD^2} < 15\%$$

ou seja,

$$\frac{a}{D} < 0,15.b.D \quad (15)$$

Substituindo-se (15) em (14), teremos :

$$\Delta C = 1 + 1,15.b.D \quad (16)$$

Ao desprezar-se a influência das perdas em vazio, o erro cometido será :

$$ERRO = \frac{0,15.b.D}{1 + 1,15.b.D} = \frac{1}{\frac{1}{0,15.b.D + 7,67}} \quad (17)$$

5.1.1 Cálculo de b.D

Consideremos a hipótese de um valor alto para o índice de perdas - l_p , da ordem de 25 % . Seja a relação de 15 % entre as perdas em vazio - a e as perdas em carga - $b.D^2$. Para esta situação, teremos ::

$$\frac{a}{b.D^2} = 0,15$$

$$a = 0,15.b.D^2$$

$$\frac{L}{D + L} = 0,25$$

$$\frac{L}{D} = 0,33333 \quad (18)$$

Mas,

$$L = a + b.D^2 \quad (19)$$

Substituindo-se, teremos :

$$L = 1,15.b.D^2 \quad (20)$$

Substituindo-se, agora, (18) em (20), teremos :

$$b.D = 0,33333 / 1,15 = 0,289$$

Para índice de perdas menores que 25 %, o valor de $b.D$ decresce . Substituindo-se o valor de 0,289 para $b.D$ na expressão (17), teremos $ERRO < 0,42 \%$. Desta forma, pode-se considerar que, para a expansão pura, teremos :

$$\Delta C = 1 + b.D \quad (21)$$

Isto é, para atender-se ao incremento de demanda máxima de 1kW fornecida aos consumidores, mantendo o mesmo nível de perdas de potência no segmento considerado, é necessário investir-se para que o segmento possa consumir mais ΔC . A relação entre esse investimento e ΔC é o chamado custo marginal da expansão pura Ou seja, ::

$$\Delta C = 1 + b.D = 1 + \frac{b.D^2}{D} = 1 + \frac{L}{D} \quad (22)$$

Considerando agora : $L = b.D^2$

E, ainda, desprezando as perdas em vazio, teremos :

$$Ip_o = \frac{L}{D + L}$$

podemos escrever que,

$$\frac{L}{D} = \frac{Ip_o}{1 - Ip_o} \quad (23)$$

Logo,

$$\Delta C = 1 + \frac{Ip_o}{1 - Ip_o} \quad (24)$$

Como era de se esperar, o incremento de demanda requisitada aos sistemas a montante - ΔC depende do índice de perdas de potência do segmento, anterior à implementação do projeto, que, no caso da expansão pura, é mantido após a implementação do mesmo (por hipótese, $Ip_0 = Ip_1$) :

5.2 Determinação Do Custo Marginal Do Ganho De Eficiência

Nesta situação, as perdas sendo reduzidas de 1 kW, através de investimentos no segmento visando exclusivamente esta redução, faz com que a demanda requisitada aos sistemas a montante seja reduzida diretamente de 1 kW . Isto, certamente, será equivalente a criar uma folga de capacidade no segmento de 1 kW, isto é, a fazer-se uma expansão de capacidade, desde que se considere como referência as condições de fornecimento da situação anterior . A Figura 3, a seguir, ilustra esta situação :

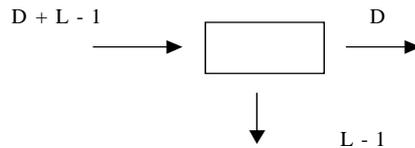


FIGURA 3 – Custo Marginal do Ganho de Eficiência

Comparando-se com a Figura 1, teremos para o decréscimo de carga devido ao ganho de perdas, traduzido por ΔL :

$$\Delta L = D + L - 1 - (D + L)$$

$$\Delta L = - 1 \quad (25)$$

Ou seja, o decréscimo de carga é numericamente igual a 1. Pelos princípios da teoria marginalista, os investimentos a serem feitos num determinado segmento para incrementar ou reduzir de 1 kW a demanda máxima vista pelo mesmo são iguais . Assim, como no caso da expansão pura, o incremento de 1 kW na demanda fornecida aos consumidores acarreta o incremento da demanda vista pelo segmento em $1 + Ip_0 / (1 - Ip_0)$, pode-se considerar que a relação entre os custos marginais da expansão pura e do ganho de eficiência, isto é, o investimento necessário para incrementar de 1kW a demanda fornecida aos consumidores e o investimento necessário para reduzir de 1 kW as perdas no segmento será :

$$\frac{CMG_{exp}}{CMG_{efic}} = \frac{Ip_o}{1 - Ip_o} \quad (26)$$

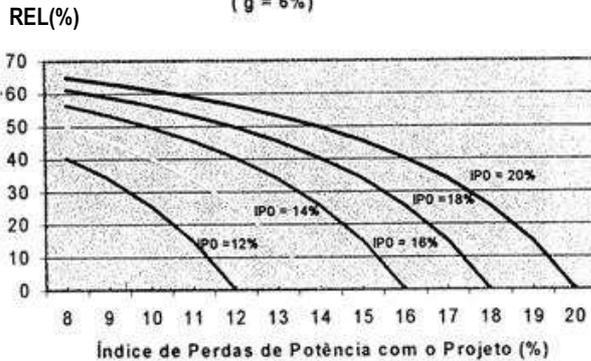
Substituindo (26) em (6), teremos a expressão consolidada para REL :

$$REL = \frac{1}{\left(1 + \frac{Ip_o}{1 - Ip_o}\right) \times \frac{g}{1 + g} \times \left(\frac{1 - Ip_1}{Ip_o - Ip_1}\right) + 1} \times 100 \quad (27)$$

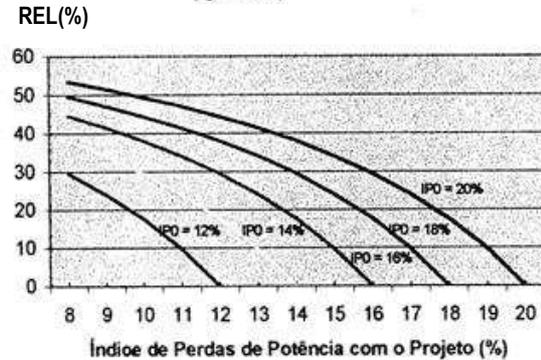
6.0 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO “REL”

A seguir, estão apresentados os Gráficos 1 e 2, sob a forma de ábacos, envolvendo o parâmetro REL, como uma função de g (para valores de 6 e 10 %) , de Ip_1 (eixo horizontal) e para diversos valores de Ip_0 (curvas) .

INVESTIMENTO EM INCREMENTO DA EFICIÊNCIA NA OFERTA
($g = 6\%$)



INVESTIMENTO EM INCREMENTO DA EFICIÊNCIA NA OFERTA
($g = 10\%$)



GRÁFICOS 1 e 2 – Análise de Sensibilidade Para Taxas de Crescimento do Mercado $g = 6\%$ e $g = 10\%$

7.0 - EXEMPLO DE CÁLCULO

Uma determinada Concessionária apresentou um projeto para redução de perdas em um determinado alimentador de Distribuição . O projeto compreende, essencialmente um recondutoramento de 10 km de rede trifásica em cabo 2 CA para cabo 4/0 CA . O índice de perdas de potência atual é de 16 % . O orçamento total do projeto é de R\$ 100.000,00, a preços de dez/2006 e a taxa de crescimento geométrico do mercado atendido é de 6 % ao ano . Após a implementação do projeto, o índice de perdas deverá ser de 10 % .

Estimar as parcelas dos investimentos imputáveis à expansão pura e ao ganho de eficiência

Solução : Pelos ábacos anteriores, ou de acordo com a equação (27), teremos $REL = 50\%$, ou seja, metade do investimento (R\$ 50.000,00) será imputado à expansão pura e a outra metade será imputável ao ganho de eficiência, devendo ser esta a parcela a ser aprovada pelo órgão regulador para efeito da legislação vigente .

8.0 - CONCLUSÕES

A expressão acima apresenta algumas propriedades que podem ser destacadas :

- A metodologia apresentada constitui-se em um instrumento importante para segregar os efeitos da expansão e dos ganhos de eficiência em projetos de sistemas de Distribuição ;
- Do ponto de vista do Regulador, é uma ferramenta importante para aferição dos reais propósitos de um determinado projeto ;
- Sob a ótica da Concessionária, o parâmetro REL pode ser utilizado para atribuir “índices de mérito” nos diversos projetos e permitir a seleção daquelas obras mais atrativas do ponto de vista da expansão ;
- Quanto maior a diferença $M_1 - M_0$, ou seja, g , menor será REL; o que é lógico (predomínio da expansão pura) ;
- Para quaisquer valores de Ip_0 e Ip_1 , desde que constante a diferença $Ip_0 - Ip_1$, REL terá o valor sempre o valor aproximado de $100 \cdot (1+g) \cdot K / (g+K)$, onde $K = Ip_0 - Ip_1$; Quanto maior a diferença $Ip_0 - Ip_1$, maior será REL, o que, também, é lógico (predominância do ganho de eficiência) ;
- Quando g tende a 0, ou seja, quando não há expansão, REL resulta próximo de 100 % , ou seja, o investimento é totalmente alocado a perdas ;
- Quando $Ip_0 = Ip_1$, não há ganho de eficiência e REL resulta igual a 0 % , ou seja, o investimento é totalmente alocado à expansão pura .

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROCHA, Mauro. C. ,“Custos Marginais Sub-Transmissão/Distribuição – Relatório 2”, Rio de Janeiro, 1983