



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Limites para a integração de usinas ao sistema de distribuição através de uma única linha

Alécio de Melo Oliveira	Valter Alves Moreira	Anderson Neves Cortez
CEMIG Distribuição S.A.	CEMIG Geração e Transmissão S.A.	CEMIG Distribuição S.A.
alecio@cemig.com.br	valter@cemig.com.br	anderson@cemig.com.br

Palavras-chave

Acesso

Conexão de usinas

Fluxo de potência

Planejamento de sistemas elétricos

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma avaliação do impacto da conexão de usinas ao sistema elétrico, quando essa conexão é feita através de uma única linha. É apresentada a metodologia utilizada em um programa desenvolvido para análise deste tipo de conexão, bem como casos exemplo, contemplando uma variedade de cenários e detalhando os limites de transferência de potência para sistemas de integração de tensões nominais iguais a 13,8; 34,5; 69 e 138 kV.

1. Introdução

A implantação de usinas de pequeno e médio porte tem sido incentivada, principalmente em função de programas governamentais tais como PROINFA e Minas PCH. A CEMIG tem avaliado a conexão de várias dessas usinas, as quais, em sua maioria, são interligadas ao sistema elétrico através de apenas uma linha de média tensão (13,8) ou de alta tensão (34,5; 69 ou 138 kV). Este tipo de conexão se deve ao fato de muitas usinas estarem localizadas longe dos centros de carga e mais próximas a sistemas radiais.

A interação entre a usina e o sistema elétrico depende de uma série de fatores, e o bom desempenho do sistema de integração depende da escolha adequada do nível de tensão nominal e tipo de cabo da linha de integração. Parâmetros como a perda ativa na linha, energia reativa drenada do sistema elétrico, restrições de tensão e fator de potência da máquina devem ser avaliados cuidadosamente.

Em alguns casos observa-se que a conexão de uma usina demanda uma quantidade de energia reativa considerável do sistema elétrico e, mesmo após tentativas de ajuste dos níveis de tensão da usina, não é possível reduzir esta demanda.

A necessidade de um melhor entendimento sobre esta interação usina/sistema elétrico motivou o desenvolvimento de uma aplicação para a análise deste tipo de conexão, permitindo a simulação de uma grande variedade de cenários, considerando variações de tensão, tipo de cabo, nível de perdas e respeitando as restrições de tensão, carregamento e fator de potência.

2. Sistema de integração de uma usina através de uma única linha

A figura 1 apresenta o sistema de integração de uma usina através de uma única linha, destacando as principais variáveis a serem avaliadas.

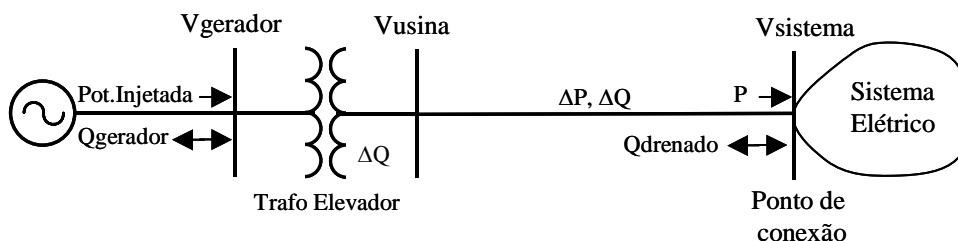


Figura 1 – Sistema de integração de uma usina através de uma única linha

Para a análise da interação entre a usina e o sistema elétrico é primordial o entendimento das variáveis que definem o fluxo em uma linha de transmissão, conforme mostrado a seguir.

3. Fluxo em uma linha de transmissão

A modelagem do fluxo de potência se dá através do desenvolvimento das equações de potência ativa e reativa do sistema. Seja a figura 2 a seguir que representa uma linha de transmissão, modelo π , interligando duas barras (k) e (m) de um sistema qualquer.

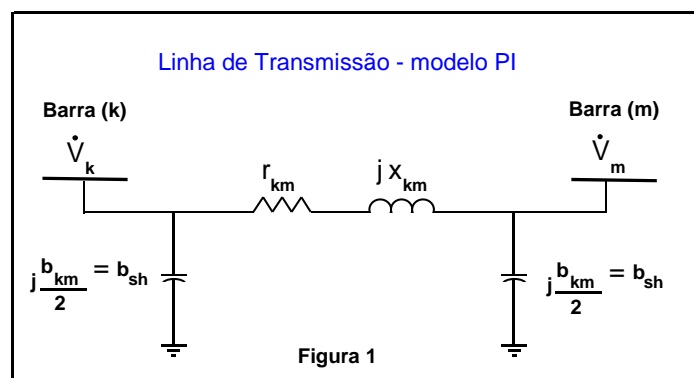


Figura 2 – Fluxo em uma linha de transmissão

Onde:

\dot{V}_k = Tensão complexa da barra k;

\dot{V}_m = Tensão complexa da barra m;

r_{km} = Re sistência série total da linha (módulo);

x_{km} = Re atância (indutiva) série total da linha (módulo);

b_{km} = Susceptância (capacitiva) shunt total da linha (módulo).

Para simplificar o equacionamento, deve-se transformar as impedâncias do sistema nas respectivas admitâncias, da seguinte forma:

$$Y_{km} = \frac{1}{(Z_{km})} = \frac{1}{(r_{km} + jx_{km})} = \left(\frac{r_{km}}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \right) - j \left(\frac{x_{km}}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \right) = (G_{km} - jB_{km}) \quad (1)$$

Onde:

G_{km} = Condutância série da linha;

B_{km} = Susceptância série da linha.

Observa-se no modelo π da linha acima que a susceptância (capacitiva) shunt total é representada por duas parcelas iguais equivalentes a $(b_{km}/2)$ em cada extremidade da linha. Essa susceptância será denominada simplesmente b_{sh} para simplificar e diferenciar da susceptância série (B_{km}).

As equações relativas aos fluxos de potência ativa e reativa na linha são mostradas a seguir:

$$P_{km} = V_k^2 G_{km} - (V_k V_m G_{km} \cos \theta_{km}) - (V_k V_m B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (B_{km} + b_{sh}) + (V_k V_m B_{km} \cos \theta_{km}) - (V_k V_m G_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

Onde P_{km} e Q_{km} são, respectivamente, as potências ativa e reativa injetadas na linha a partir do terminal k e θ_{km} é o ângulo entre a tensão V_k e a tensão V_m .

Observa-se que a potência ativa injetada na linha a partir do terminal k (P_{km}) depende dos módulos das tensões dos dois terminais da linha (V_k e V_m), do ângulo entre as mesmas (θ_{km}) e dos parâmetros série da linha (G_{km} e B_{km}). A potência reativa injetada na linha depende dos mesmos fatores e também da susceptância shunt (b_{sh}).

4. Programa para análise da integração de usinas através de uma única linha

Conforme mostrado no item 3, o fluxo em uma linha de transmissão depende de uma série de fatores. Para analisar o comportamento do sistema de integração de uma usina através de uma linha e seu impacto na interface com o restante do sistema elétrico, foi desenvolvido um programa em uma planilha eletrônica onde foram implementados os cálculos de fluxo de acordo com as equações (2) e (3).

Este programa permite a modelagem deste tipo de conexão e a simulação de vários cenários, variando a potência injetada pela usina, as tensões na barra da usina e no ponto de conexão ao sistema elétrico, o cabo da linha de interligação, o comprimento e tensão nominal desta linha. Para cada combinação destes fatores é gerado um registro com as seguintes informações:

- Ângulo entre as tensões da barra da usina e do sistema;
- Perda reativa no transformador elevador e na linha;
- Perda ativa na linha;
- Potência ativa injetada na linha e no ponto de conexão;
- Potência reativa injetada ou drenada no gerador, na linha e no ponto de conexão;
- Potência aparente na linha;
- Fator de potência do gerador e do ponto de conexão;

- Tensões da barra do gerador, barra de alta da usina e do ponto de conexão com o sistema elétrico.

O programa permite a seleção dos dados gerados de acordo com os seguintes critérios:

- Faixa de tensão das barras;
- Limite de carregamento do cabo;
- Perda máxima admissível na linha;
- Fator de potência mínimo no gerador;
- Fator de potência mínimo no ponto de conexão.

A seguir são apresentados os resultados de simulações utilizando o referido programa.

5. Simulações

Foram realizadas simulações com o objetivo de apresentar uma visão mais geral possível da integração de usinas de pequeno e médio porte através de uma única linha.

As premissas adotadas nestas simulações foram as seguintes:

- Faixa de tensão na barra de alta da usina : $0,95pu \leq V_{usina} \leq 1,05pu$;
- Tensões no ponto de conexão (barra do sistema): $V_{sistema} = 1,0 ; 1,025 \text{ e } 1,05 pu$;
- Tensão terminal no gerador: $V_{gerador} \leq 1,05 pu$;
- Fator de potência mínimo no gerador: $Fp_{gerador} = 0,9$;
- Tensões nominais da linha: 13,8 ; 34,5 ; 69 e 138 Kv;
- Potência ativa injetada na linha: $1 MW \leq Pinjetada \leq Limite \text{ da linha}$;
- Capacidade do transformador elevador: $Strafo (MVA) = Pinjetada / Fp_{gerador}$;
- Reatância do transformador elevador: $Xt = 10\%$ na base de potência do transformador;
- Comprimento da linha: 1 a 100 km;
- Cabo: Linnet.

O programa permite a escolha do cabo da linha de interligação, no entanto, para reduzir o número de cenários foi escolhido o cabo Linnet (170,5 mm²), cujas capacidades limites são mostradas na tabela a seguir, em função da tensão nominal.

Tabela 1 – Capacidade da linha x Tensão nominal – Cabo Linnet (170,5 mm²)

Cabo	Capacidade (MVA) x Tensão de operação (kV)			
	138 kV	69 kV	34,5 kV	13,8 kV
Linnet (170,5 mm ²)	125,2	62,6	31,3	12,5

5.1. Potência Máxima Injetada

Primeiramente foram realizadas simulações para se constatar qual a maior potência que poderia ser injetada na linha, considerando-se as restrições de tensão e fator de potência do gerador, independente das perdas ativas na linha e do fator de potência no ponto de conexão com o restante do sistema elétrico. Foram representadas linhas com comprimento variando de 1 a 100km.

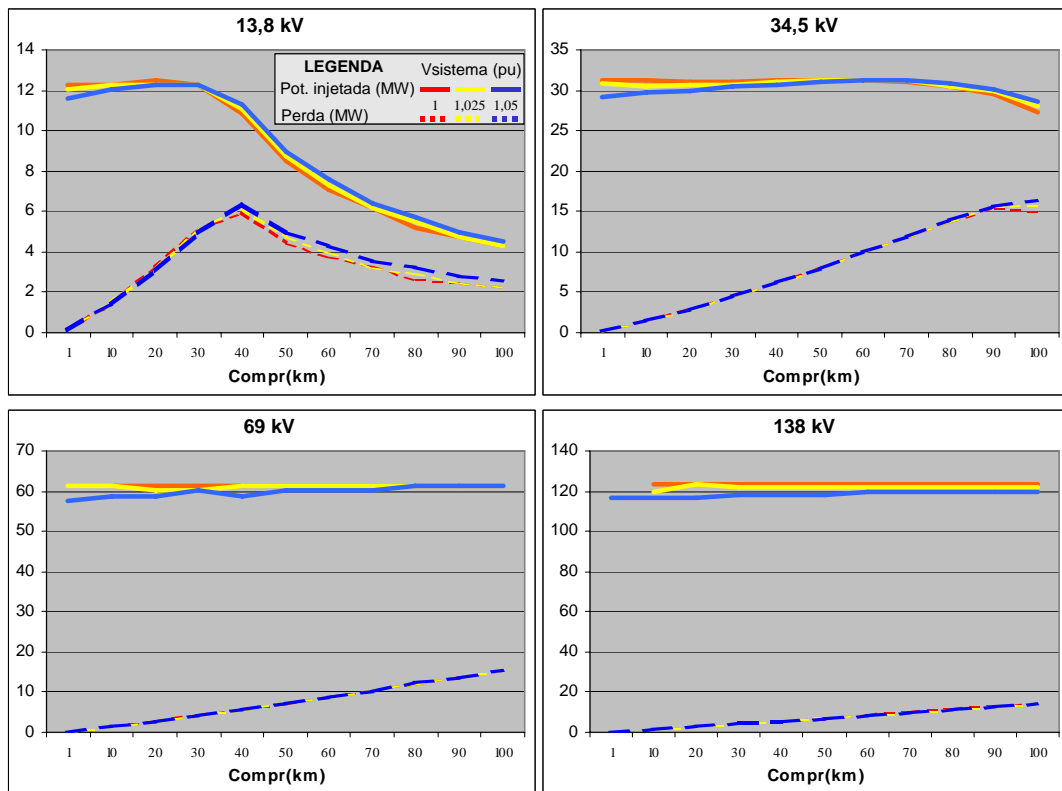


Gráfico 1 - Potência Máxima Injetada

Verifica-se que para linhas de comprimento igual ou superior a 40km operando em 13,8 kV não é possível transmitir uma potência correspondente à capacidade do cabo Linnet. A partir deste ponto a potência máxima transmitida se reduz consideravelmente. Para linhas operando em 34,5 kV, este limite ocorre para comprimentos iguais ou superiores a 90km. No entanto, mesmo para linhas bem menores que estes limites, os níveis de perdas chegam a valores muito elevados. Ressalta-se que, com o aumento da tensão nominal da linha, o nível de perdas se reduz consideravelmente, mesmo considerando-se maiores valores de potência transmitida.

Verifica-se também que existe pouca variação dos valores potência injetada e perda em função da tensão no ponto de conexão ($V_{sistema}$).

O Gráfico 2 apresenta os valores de potência reativa fornecida pelo gerador e drenada do sistema elétrico no ponto de conexão, correspondentes às potências injetadas mostradas no Gráfico 1.

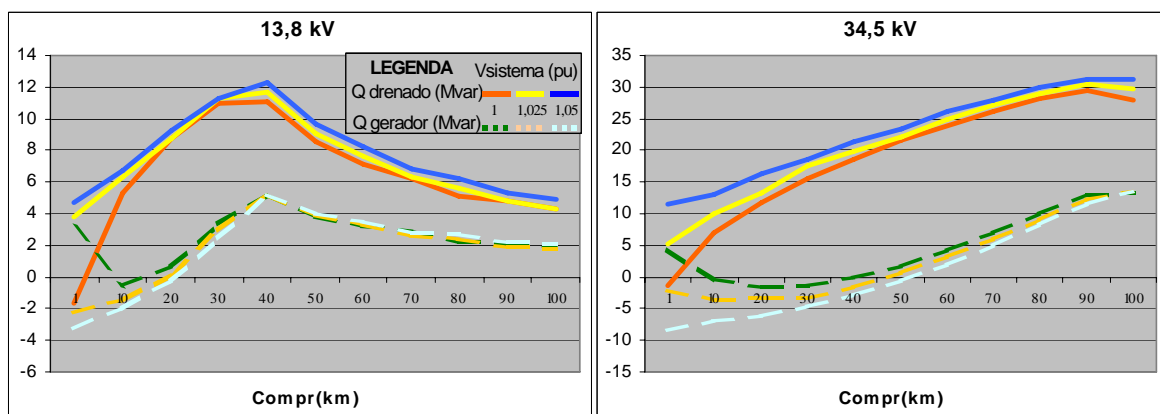


Gráfico 2 (continua na próxima pg)

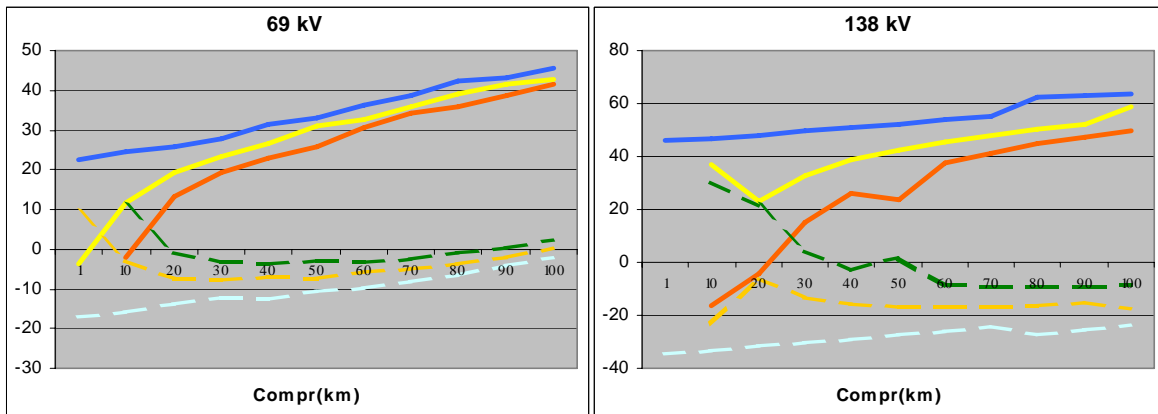


Gráfico 2 - Potência reativa fornecida pelo gerador e drenada do sistema elétrico

Observa-se que, em quase todos os cenários simulados, é drenada uma quantidade razoável de energia reativa do sistema elétrico, no ponto de conexão. As únicas situações onde o sistema elétrico recebe energia reativa no ponto de conexão ocorrem nos casos de linhas mais curtas, variando de 1 a 20 km, dependendo da tensão nominal, quando a tensão no ponto de conexão é igual a 1 pu, ou seja, o menor nível dentre os três simulados.

Observa-se que, para linhas mais curtas, existe uma maior sensibilidade da potência reativa no ponto de conexão e no gerador em relação ao nível de tensão do ponto de conexão. Destaca-se também o grande número de situações em que o gerador absorve potência reativa, principalmente nas tensões nominais mais elevadas (69 e 138 kV).

O gráfico 3 apresenta os valores de fator de potência no ponto de conexão. Estes valores foram calculados com base na potência reativa drenada do sistema elétrico e a potência ativa injetada no ponto de conexão, a qual é igual à potência ativa injetada pela máquina menos a perda ativa na linha.

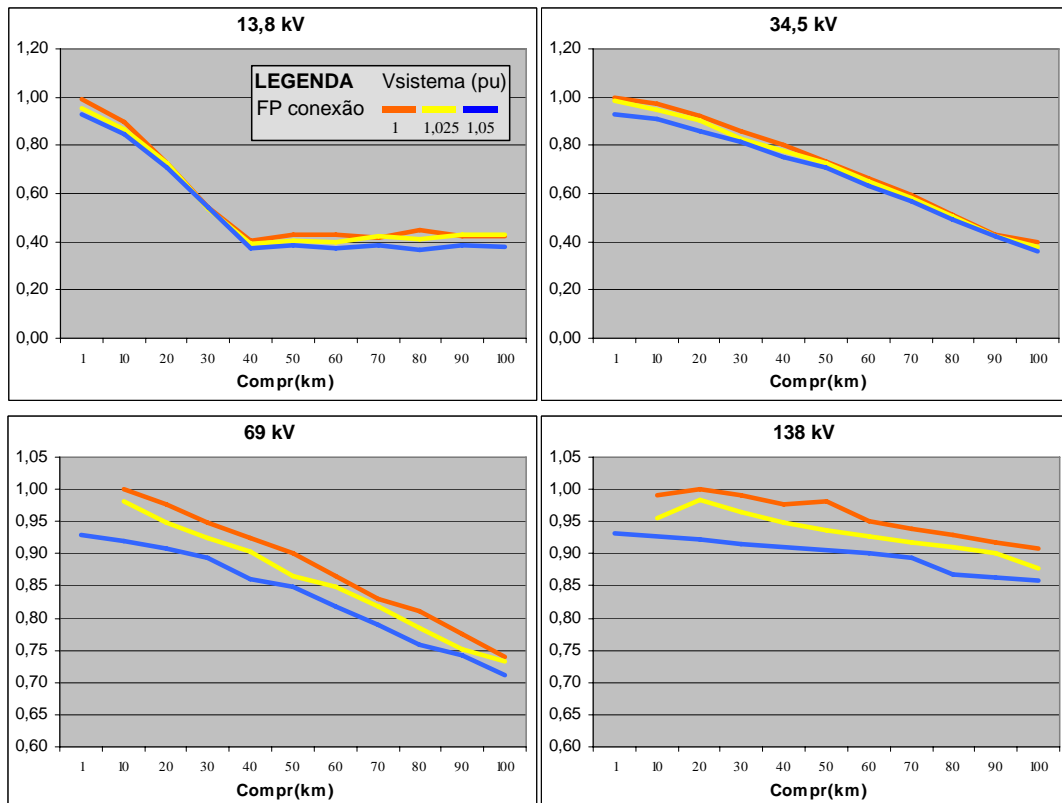


Gráfico 3 - Fator de potência no ponto de conexão

Observam-se valores de fator de potência muito baixos, em consequência dos elevados valores de potência reativa drenados do sistema elétrico, conforme mostrado no gráfico 2.

O gráfico 4 apresenta os níveis de tensão nos terminais do gerador e na barra de alta da usina. Por limitação de espaço, são apresentados apenas os resultados para linhas com tensão nominal igual a 34,5 kV.

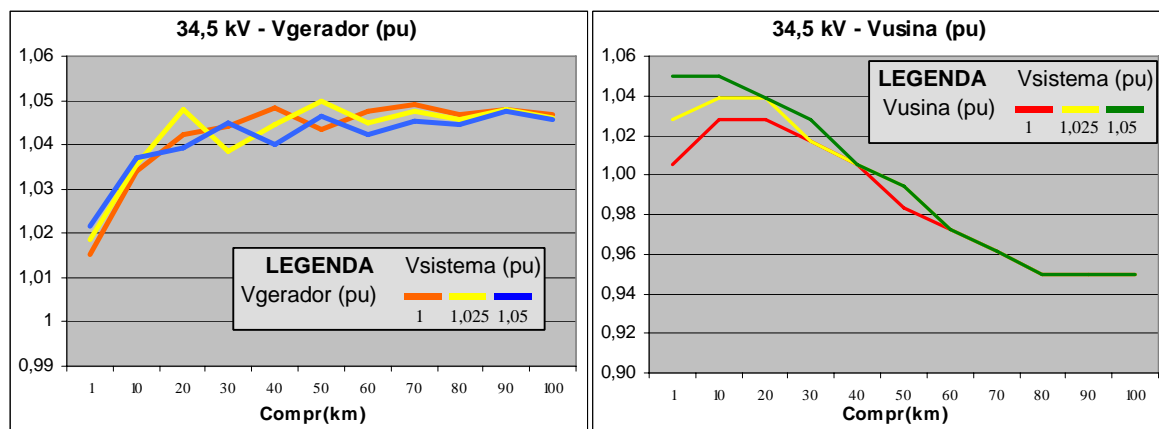


Gráfico 4 - Tensões na barra do gerador e na barra de alta de usina

Para linhas menores, observam-se tensões terminais do gerador menores. Com o aumento do comprimento das linhas, são verificados maiores valores destas tensões, em alguns casos atingindo o limite de 1,05 pu. As variações abruptas nos níveis de tensão se devem ao fato de que o número de níveis utilizado nas simulações teve que ser limitado, evitando-se assim um tempo de simulação extremamente elevado.

A tensão da barra de alta da usina segue um caminho inverso, começando em níveis maiores, para linhas pequenas e reduzindo o valor para linhas maiores. A partir de 80 km, esta tensão atinge o limite inferior estabelecido, que foi de 0,95 pu.

Observa-se que, para linhas mais curtas, existe uma maior sensibilidade das tensões no gerador e barra de alta da usina em relação ao nível de tensão do ponto de conexão, tal como verificado no fluxo de potência reativa.

5.2. Potência máxima injetada considerando restrição de perda ativa máxima

O gráfico 5 apresenta os valores de potências máxima injetadas na linha considerando três patamares de perda ativa máxima: 5%, 10 e 20%. Estes valores foram obtidos para um nível de tensão no ponto de conexão ($V_{sistema}$) igual a 1,05 pu. Conforme mostrado no item 5.1, o nível de perdas varia muito pouco com a variação da tensão do ponto de conexão.

Ressalta-se que níveis muito elevados de perda tendem a tornar inviável economicamente o empreendimento de construção e integração de uma nova usina. As perdas até o ponto de conexão são de responsabilidade do empreendedor.

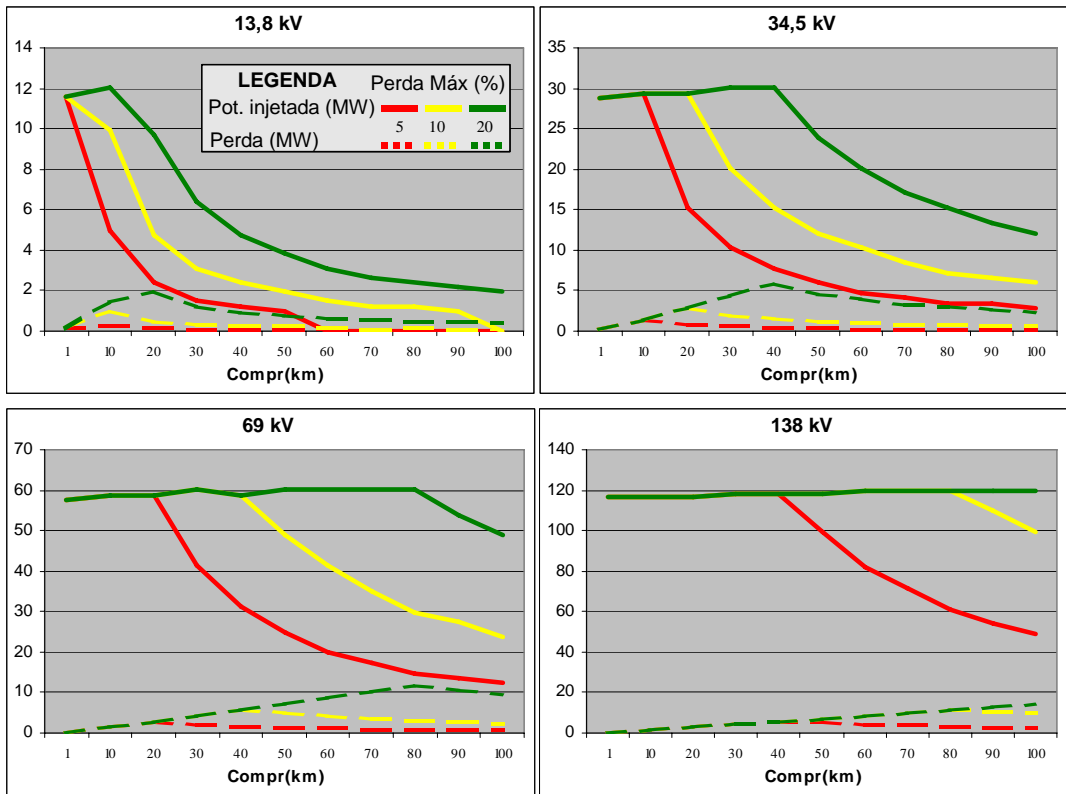


Gráfico 5-Potência máxima injetada considerando restrição de perda ativa máxima ($V_{sistema}=1,05$ pu)

Como exemplo, uma usina de 15 MW localizada a 40 km do sistema elétrico poderá ter sua potência escoada por uma linha de 34,5 kV (cabo Linnet), com um nível de perdas igual a 10%. Caso se opte pela transmissão em 69 kV, o nível de perdas será reduzido para bem menos que 5%.

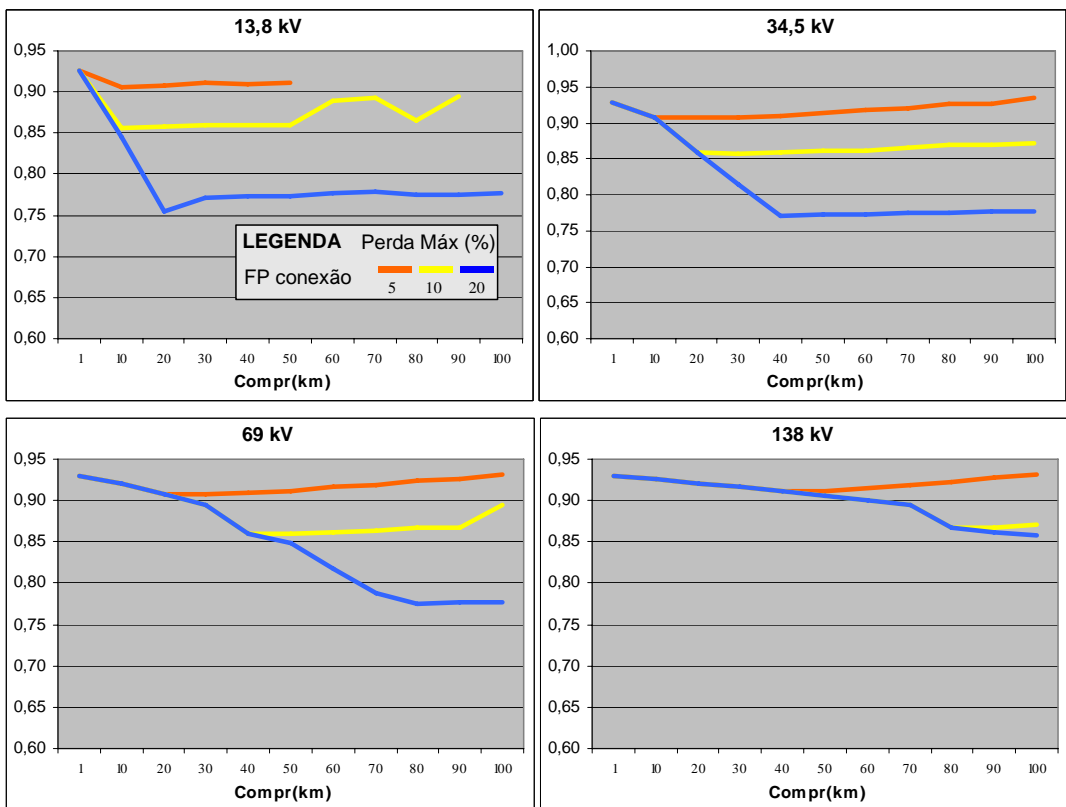


Gráfico 6 - Fator de potência no ponto de conexão - considerando restrição de perda ativa máxima

Observa-se que os fatores de potência ainda continuaram relativamente baixos, principalmente para as simulações com maiores níveis de perda. Nestes casos pode-se tornar necessária a implantação de equipamentos de compensação reativa, para evitar que a conexão da usina resulte em degradação dos níveis de tensão em outros pontos do sistema.

6. Conclusões e recomendações

A implantação de usinas de pequeno e médio porte tem sido incrementada, e um número considerável destas integrações se dá através de uma única linha de distribuição de média tensão ou alta tensão.

Neste trabalho foi apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento de um programa para a análise deste tipo de integração. Foram apresentados também os resultados de simulações, destacando os limites de transferência de potência para quatro níveis de tensão nominal (13,8; 34,5; 69 e 138 kV), considerando as restrições de tensão nas barras do sistema de integração e níveis de perdas.

Os resultados apresentados permitem a visualização de situações problemáticas para o sistema elétrico, tais como elevado nível de perdas na linha de conexão e elevada energia reativa absorvida do sistema elétrico. Nestes casos é necessário reavaliar os parâmetros do sistema de conexão, principalmente o cabo e/ou a tensão da linha de integração.

É importante destacar que este tipo de análise não tem por objetivo substituir a análise completa do impacto da integração da usina no sistema elétrico. O estudo completo exige a representação detalhada do sistema elétrico e avaliação da necessidade de reforços para a implantação da usina. No entanto, os resultados apresentados fornecem uma visão geral da conexão e servem de subsídio para a definição de alternativas, a serem avaliadas no estudo detalhado.

7. Referências bibliográficas

1 STEVENSON, G, GRAINGER, J. Power System Analysis; McGraw-Hill, Inc. New York, 1994. 786p.