

Eletrificação de pequenas vilas próximas das linhas de transmissão usando acoplamento eletromagnético

Joan Sebastian Chaves Huertas
Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
UNICAMP
Campinas, Brasil
E-mail: jschaves@dsce.fee.unicamp.br

Maria Cristina Tavares
Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
UNICAMP
Campinas, Brasil
E-mail: cristina@dsce.fee.unicamp.br

Resumo— Neste trabalho é apresentada uma forma de atender pequenas cargas de 500 kW localizadas próximas de linhas de transmissão de Extra Alta Tensão. O atendimento destas cargas não é trivial, seja pelo aspecto técnico ou financeiro. Estas cargas podem ser atendidas através das perdas de energia confinadas nos cabos para-raios das linhas de transmissão. O processo consiste no isolamento de um trecho de um dos cabos para-raios associando-o a um reator de sintonização. Os resultados do estudo obtidos com o PSCAD e ATP são apresentados.

Palavras chaves -- Cabos para-raios isolados, alimentação rural, linhas de transmissão.

I. INTRODUÇÃO

Muitos dos projetos desenvolvidos no Brasil têm o objetivo de abastecer a demanda elétrica das principais regiões onde está localizada a maioria das indústrias e grande parte da população do Brasil. Porém, o fornecimento de energia para pequenas vilas e comunidades rurais que estão distantes das zonas de subtransmissão e distribuição, ou mesmo de distribuição rural, é escasso e difícil, sendo um grande desafio tecnológico [1-2].

Em muitos casos, os projetos de linhas de transmissão são feitos longe das principais rodovias do país e seu percurso atravessa ou faz fronteira com pequenas vilas e povoados que não têm atendimento elétrico.

Uma das barreiras que impossibilitam o acesso à eletricidade é o alto custo do sistema de transformação (redução da tensão) e de distribuição necessário, muitas vezes de comprimento muito elevado. Além disto, um dos problemas mais importantes é a pequena e dispersa demanda que aparece pela baixa densidade populacional e os baixos níveis de financeiros daquelas vilas, que dão lugar ao incremento dos custos médios do fornecimento do serviço de eletricidade [3-4].

A situação dos habitantes que moram próximo às linhas de transmissão é complexa pelo fato de que a potência transportada nessas linhas é elevada, assim como a tensão de operação, impossibilitando a transformação para níveis de carga pequenos (um pouco mais de 100 kW). Análises sobre a viabilidade de uma subestação de abaixadora em tensões de 500/13,8 kV mostram que a potência mínima do ponto de vista de investimento versus retorno seria em torno de 600 MVA [5]. Pelo relatado, as empresas de transmissão e de distribuição não conseguem atender a um projeto dessa magnitude.

Para resolver este tipo de problema já foram propostas diferentes soluções não convencionais, sendo uma delas o uso dos cabos para-raios (PR) isolados como alimentador utilizando a tensão induzida pelo acoplamento com as fases das linhas de transmissão de alta potência.

O uso da indução de tensão em cabos PR isolados representa uma solução para aqueles lugares que estão mais distantes de subestações de transformação, mas que estão próximos das linhas de transmissão de alta potência [2].

No presente trabalho é apresentado o modelamento de uma linha de transmissão com cabos PR isolados definindo os valores de tensão e potência máxima extraíveis. São analisadas diferentes configurações de conexão para os cabos PR isolados. Um estudo de energização da linha de transmissão é apresentado, avaliando os transitórios no sistema de fornecimento de energia. Pelos resultados obtidos é possível afirmar que esta é uma alternativa viável para atender a pequenas cargas isoladas próximas de linhas de transmissão.

II. MODELAMENTO DO SISTEMA DE CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS

As tensões nos condutores de fase em uma linha alta tensão (AT) ou extra alta tensão (EAT) geram, devido ao acoplamento capacitivo, tensões induzidas nos cabos para-raios. A energia disponível nos cabos para-raios pode ser utilizada para alimentar pequenos povoados localizados próximos à linha, e que no seu cotidiano não têm acesso à eletricidade, podendo ser chamados de população sem luz.

A Figura 1 apresenta as capacitâncias entre um cabo para-raios (PR) e os demais cabos de uma linha de transmissão com dois cabos para-raios.

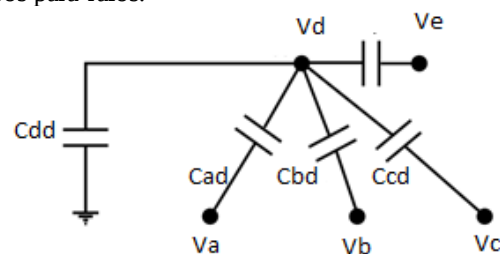


Figura 1. Capacitâncias próximas ao cabo para-raios

As capacitâncias são função da geometria da linha de alta tensão. Na figura 2 é apresentado o circuito equivalente da tensão nos cabos para-raios (neste trabalho denominados de fases D e E). Note-se que V_d e V_e correspondem às tensões induzidas nos cabos PR, sem a contribuição de um no outro. Analisando a parte esquerda do circuito da Figura 2 tem-se que a tensão no nó D é determinada pela equação (1), sendo Y_{ad}, Y_{bd}, Y_{cd} e Y_{dd} as admitâncias $Y = j\omega C$ associadas às capacitâncias apresentadas. A expressão mostra a influência das tensões das fases no cabo PR, sendo maior a tensão induzida quanto maior forem as tensões nas fases. Porém, esta tensão irá diminuir com o aumento da admitância própria do cabo PR.

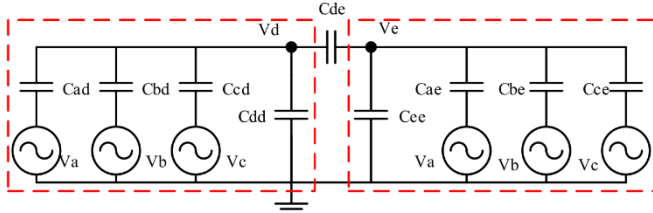


Figura 2. Circuito equivalente do acoplamento capacitivo dos cabos numa linha de transmissão.

$$\hat{V}_d = \frac{\hat{V}_a Y_{ad} + \hat{V}_b Y_{bd} + \hat{V}_c Y_{cd}}{Y_{ad} + Y_{bd} + Y_{cd} + Y_{dd}} = \hat{V}_{thd} \quad (1)$$

Para resumir o modelo é preciso calcular a tensão Thevenin, que no caso corresponderá à equação 1. Desta forma a sua admitância de Thevenin será descrita pela equação (2). Aquele equivalente descreve a tensão de saída no caso de uma linha só ter um cabo para-raios.

$$Y_{thd} = Y_{ad} + Y_{bd} + Y_{cd} + Y_{dd} \quad (2)$$

Do mesmo modo pode-se calcular os equivalentes para o segundo cabo para-raios. Em geral, as linhas de AT e EAT têm dois cabos para-raios e apresentam plano de simetria em relação ao eixo da torre de transmissão. Assumindo que seja o caso do circuito da Figura 2, as admitâncias Y_{bd} e Y_{be} serão iguais, consequentemente, $Y_{ad} = Y_{ce}$ e $Y_{dd} = Y_{cd}$.

O modelo de tensão induzida é reduzido ao mostrado na Figura 3, com os dois equivalentes de Thevenin para cada cabo para-raios e sendo conectados pelo acoplamento capacitivo Y_{de} que existe entre eles.

A tensão V_d também depende da tensão no outro cabo PR. Novamente, um equivalente de Thevenin pode ser empregado para reduzir o modelo a uma admitância de transferência com uma fonte em série. A admitância equivalente é descrita pela equação (3), assim como a tensão do equivalente é apresentada na equação (4).

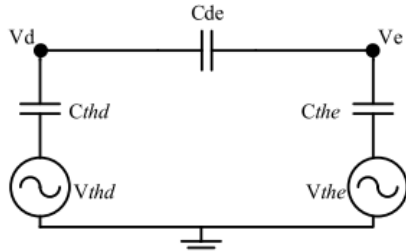


Figura 3. Circuito equivalente considerando somente os cabos PR

$$Y_d = Y_{thd} + \frac{Y_{de} Y_{the}}{Y_{de} + Y_{the}} \quad (3)$$

$$\hat{V}_d = \frac{(\hat{V}_{thd} Y_{thd})(Y_{the} + Y_{de}) + Y_{the} Y_{de} \hat{V}_{the}}{(Y_{the} + Y_{de})(Y_{thd} + Y_{de}) - Y_{de}^2} \quad (4)$$

A equação de V_d representa a tensão para a linha em vazio, ou seja, a tensão que aparece no cabo para-raios somente pelo efeito capacitivo. Os efeitos eletromagnéticos são desprezíveis pelo seu baixo aporte na tensão de indução, o que significa que a tensão nas fases D e E não é função do comprimento da linha isolada [5].

Considerando uma carga puramente resistiva no nó V_d a máxima potência entregue pode ser calculada através do Teorema da Máxima Transferência de Potência, ou seja, se a carga for igual a Y_d , teremos na equação (5) o valor da maior potência a ser entregue pelo sistema. Na prática aqueles valores de potência também são limitados pelo maior valor de tensão no cabo.

$$S_{max} = \frac{V^2 Y}{4} = \frac{V^2 C \omega}{4} \quad (5)$$

$$S_{max} = \frac{1}{4} \frac{(Y_{the} Y_{thd} \hat{V}_{thd} + Y_{ed} Y_{thd} \hat{V}_{thd} + Y_{the} Y_{ed} \hat{V}_{the})^2}{(Y_{the} + Y_{ed})(Y_{ed} Y_{thd} + Y_{the}(Y_{ed} + Y_{thd}))} \quad (6)$$

Considerando que as capacitâncias da equação (6) são valores por unidade de comprimento da linha, verifica-se que a potência a ser transmitida será função do trecho de cabo PR isolado, sendo maior a potência gerada quanto maior for o trecho isolado.

A. Regulagem de tensão.

Analisando a equação (3) verifica-se que a admitância Y_d restringe uma boa regulação da tensão na carga em função do seu elevado valor, sendo necessário que a carga tenha uma admitância muito menor para que a sua tensão não varie muito. Isto significa que não será possível utilizar o cabo PR puro para alimentar a pequena carga, sendo necessário tornar esta geração mais forte.

Para aumentar a potência de curto da fonte capacitiva será inserido em série com o circuito de alimentação um indutor que tenha uma impedância em módulo igual ao da capacitância equivalente do sistema de Thevenin, resultando numa condição de ressonância. Desta forma a impedância equivalente do sistema de alimentação será muito baixa, tornando a tensão na carga igual à tensão na fonte equivalente, produzindo uma fonte forte no equivalente de Thevenin [6].

Veja-se pela Figura 4 as equações da malha:

$$\hat{V}_d = I \left(\frac{1}{j\omega C_d} \right) + I j\omega L_d + V_c \quad (7)$$

Se L_d for $L = \frac{1}{\omega^2 C_d}$ então:

$$V_d = V_c \quad (8)$$

A potência a ser entregue para a carga será máxima em função da ressonância obtida entre a capacitância do equivalente de Thevenin e o reator série, maximizando a extração de energia.

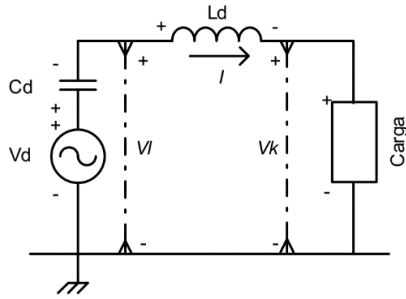


Figura 4. Circuito equivalente da geração de energia a partir dos cabos PR com o reator em série (Fase D)

III. DEFINIÇÕES DA SIMULAÇÃO

A. Modelamento da carga rural

A estimativa das cargas elétricas foi feita através da análise das necessidades das comunidades atuais, aplicando tendências e planos de expansão que um sistema elétrico rural possa ter [7]. Baseado no perfil do beneficiário do programa Luz para Todos pode-se estimar o tipo de carga elétrica que se deve modelar.

Mais de 40 % destes domicílios são de trabalhadores rurais localizados em áreas de difícil acesso. Uma menor parte deste conjunto corresponde a donas de casa aposentadas e artesãos. A renda familiar destas populações é de no máximo 2 salários mínimos, o que implica em dificuldades para custear a colocação de redes e postes de distribuição de custo muito elevado [8]. Desta forma, a estrutura de fornecimento de energia para aquela população não pode ser de alto custo, levando em conta que a manutenção será difícil e novamente cara.

A Amazônia brasileira é um claro exemplo de localidades espalhadas no território com um déficit de energização rural devido à complexidade e altos custos operacionais de acesso aos métodos de fornecimento de energia convencionais. Por meio de redes convencionais uma parcela das moradias rurais na Amazônia está sendo eletrificada a partir do Sistema Interligado Nacional; em muitos locais geradores a diesel são colocados à disposição das comunidades isoladas, mas neste caso é necessário que estas comunidades recebam o diesel com regularidade. No caso de vilarejos mais afastados não existe uma rede de interligação e pequenos geradores são adquiridos por conta própria, com potência entre 10 e 100 kVA. Esta informação permite estimar as cargas elétricas nas zonas rurais mais afastadas, sendo que os geradores são usados com um excessivo custo do combustível [9].

A deficiência energética em zonas isoladas gera um risco para os produtos perecíveis devido às longas distâncias até os centros de transformação, sendo que em função da falta de refrigeração os produtos muitas vezes precisam ser comercializados a preços muito baixos, para não haver uma perda total da produção, prejudicando a economia do setor.

Por outro lado, dado que a comunicação constitui-se numa nova necessidade nesta era de telefonia celular, embora existam redes móveis cobrindo a região, a dificuldade para carregar os aparelhos termina atrapalhando os trabalhos cotidianos. Isto decorre das grandes distâncias que as pessoas devem percorrer até as zonas com o acesso à eletricidade.

Foram analisados dados de pequenas vilas com menos de 1000 pessoas. Aquelas moradias, de casas de família simples nas quais o consumo de energia será principalmente em iluminação do local, rádio e uso de alguns eletrodomésticos básicos e de

comunicação, correspondem às cargas primárias a serem atendidas. Como base para desenvolvimento econômico foi considerada a existência de pequenas geladeiras nas casas para armazenamento de alimentos perecíveis. Nestas zonas de trabalho rural, motores pequenos estão contemplados nos planos de expansão inicial. Desta forma foi definida uma carga elétrica por casa com valores típicos, como mostrado na Tabela I.

TABELA I. CARGA NOMINAL DE CASA RURAL SIMPLES, COM PLANO DE EXPANSÃO FUTURA.

	Quantidade	Potência Unitária [W]	Potência Total [W]
Iluminação	3	20	60
Tomadas	3	180	540
Geladeira	1	500	500
Motor ¾ HP	1	800	800
Total por casa [W]			1900

Esta aproximação de carga rural coloca como meta de 260 casas um fornecimento de energia no mínimo de 500 kW, a 10 km da linha de transmissão de 500 kV.

B. Topologia da linha de transmissão

O sistema a ser estudado é formado por uma unidade geradora, transformador elevador, disjuntor, linha de 500 kV de 300 km compensada com reatores em derivação e rede terminal como se mostra na Figura 5.

Foi suposta a transposição da linha alternando a posição das fases com a seguinte sequência: $\frac{1}{6}$ da linha, $\frac{1}{3}$ e finalmente $\frac{1}{6}$ do comprimento total da linha, ou seja, no locais: 50 km - 100 km - 100 km - 50 km, respectivamente.

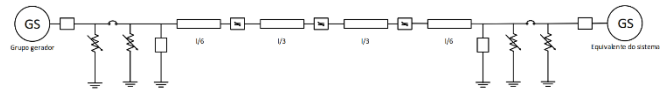


Figura 5. Diagrama unifilar do sistema simulado.

O estudo foi feito baseado na estrutura estaiada da torre Cross-Rope de 500 kV (esta configuração de linha é usada no Brasil na linha Tucuruí - Marabá) com 300 km de comprimento, com quatro cabos Bluejay por feixe e dois cabos para-raios de aço galvanizado 3/8" EHS.

Os quatro sub-condutores dos feixes estão situados nos vértices de um quadrado de 0,914 m de lado. Os centros dos feixes dos condutores das fases estão situados a 32,5 m do solo. A distância horizontal entre o centro da fase central e o centro de quaisquer das fases laterais é 5,5 m.

Os cabos para-raios estão localizados a 41,3 m do solo e a distância horizontal entre o centro da fase do meio e cada cabo para-raios é de 6 m. O vão médio é de 400 m. As características da flecha dos condutores a 60 °C: a meio do vão é 13,4 m, para os cabos para-raios a 40 °C: 6,4 m. A resistividade média do solo é 4000 Ω.m.

A partir das características físicas da linha foram calculadas as suas matrizes de parâmetros transversais e longitudinais no domínio das fases. O modelamento não pode considerar que a linha de transmissão é idealmente transposta com os cabos para-raios implicitamente representados. Os cabos para-raios são condutores contínuos e, ao contrário dos condutores de fase, não são transpostos. Desta forma os trechos de transposição devem ser representados explicitamente. O tratamento matemático adequado para diagonalizar as matrizes Z_{fase} e Y_{fase} é baseado

na teoria de parâmetros modais, que é derivada do uso de autovalores e autovetores [10-11].

É importante destacar que o efeito dos cabos PR não pode ser incorporado nos parâmetros da linha, pois os cabos serão utilizados como condutores de energia. A tabela II apresenta os valores modais calculados para uma frequência de 60 Hz, sendo estes os valores de resistência modal por unidade de comprimento, impedância característica e velocidade de propagação. Note-se que os modos 1 e 2 correspondem aos cabos para-raios, sendo notável a diferença na resistência com os modos ditos aéreos (modos 4 e 5), assim como a menor velocidade de propagação. O modo 3 corresponde ao modo dito terra (próximo à sequência zero), com impedância característica maior do que os modos aéreos e velocidade de propagação menor. A velocidade de propagação dos modos aéreos é próxima à da luz.

TABELA II. PARÂMETROS MODAIS PARA A LINHA DE 500 kV, CALCULADOS PARA 60 HZ.

Modo	R'_{modal} [Ω /km]	Z_c [Ω]	Vel [km/ms]
1	4,14	986,49	153,33
2	3,59	953,98	159,15
3	0,36	812,54	183,53
4	0,015	206,04	295,96
5	0,014	151,98	296,10

IV. RESULTADOS

A. Perfil de tensão ao longo da linha.

Após o modelamento foram analisadas configurações dos cabos PR isolados e segmentados em trechos que não envolvesse nenhuma transposição, evitando a queda de tensão induzida nas fases D e E.

Foi suposto que as vilas a serem atendidas encontram-se afastadas das subestações terminais. Foi definido que a carga a ser atendida encontra-se a 200 km do terminal emissor, sendo o trecho do cabo PR a ser isolado do km 150 ao km 250. O perfil de tensão no cabo PR isolado, supondo a linha de transmissão em vazio, é apresentado na Figura 6.

A tensão induzida nos cabos PR é de 28 kV, sendo constante ao longo do comprimento de cabo PR isolado. Esta tensão é muito próxima nos dois cabos PR. A diferença de tensão nos cabos PR é função da geometria da torre.

Na figura 7 é apresentado o perfil de tensão induzida para o caso com 50 km isolados somente. Nota-se que o valor de tensão induzida é o mesmo do caso anterior, mostrando que a tensão induzida não depende do comprimento de cabo isolado, mas sim da geometria e do nível de tensão da linha.

Foram analisados também cenários aterrando um dos cabos (fase E e fase D, respectivamente), mantendo o outro isolado por 100 km desde o terminal 150 km até o terminal 250 km. No caso somente com um cabo PR aterrado existe uma pequena diferença entre as tensões induzidas que ficam 5 % maiores do que no caso com dois cabos isolados.

O último cenário analisado consistiu do isolamento de 100 km de cabo entre os terminais 100 e 200 km, envolvendo uma torre de transposição no trajeto, mostrado na Figura 8 Neste cenário a transposição reduz a tensão induzida nas fases D e E à metade, o que pode ser explicado pelo fato de ter a mesma quantidade de cabo isolado em cada lado da transposição. Esta configuração mostrou ser necessário utilizar trechos de cabo PR isolado sem envolver torres de transposição.

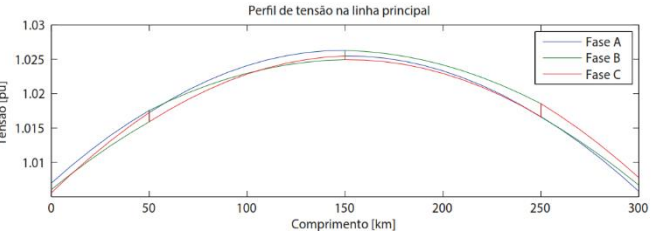


Figura 6. Perfil de tensão na linha e nos cabos PR com a linha transposta - Cabos PR isolados do km 150 a 250.

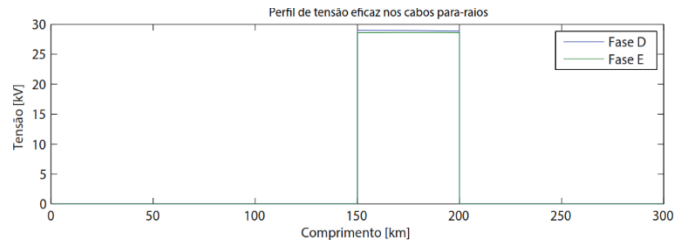


Figura 7. Perfil de tensão nos cabos PR - Cabos PR isolados do km 150 a 200

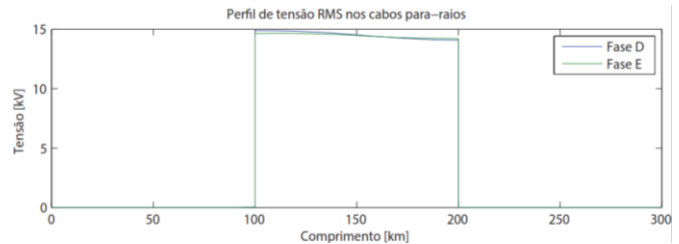


Figura 8. Perfil de tensão nos cabos PR - Cabos PR isolados do km 100 a 200

Conforme os resultados anteriores e segundo as equações (5) e (6), o caso com somente um cabo PR isolado produz uma tensão induzida ligeiramente maior no cabo PR e, portanto, gerará uma maior de potência. O cenário escolhido para estudo foi, portanto, o com um único cabo PR isolado para uma linha horizontal de circuito simples.

B. Dimensionando o reator de sintonização e variando a carga rural.

A Figura 9 mostra o cenário de variação de carga rural sem o uso de reator de sintonização. A carga foi representada por uma impedância constante puramente resistiva calculada para uma tensão base de 30 kV. Devido à alta impedância interna da fonte não é possível fornecer a energia para a carga base com uma tensão constante sendo necessário um sistema de regulação de tensão.

Para melhorar o desempenho do sistema de alimentação foi incluído um reator em série no circuito. O reator de sintonização foi obtido a partir da relação entre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito na fonte, supondo que a impedância interna da fonte de tensão induzida no cabo PR é praticamente capacitiva pura.

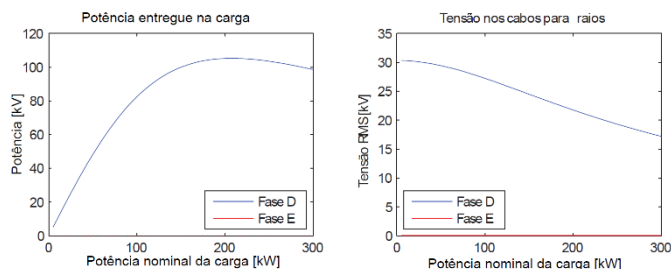


Figura 9. Potência e tensão eficaz no cabo PR, com variação da carga no terminal 200 km para linha de transmissão em vazio sem reator de sintonização.

O reator de sintonização obtido, supondo a linha de transmissão em vazio, foi de $4165,5 \Omega$. As simulações foram feitas supondo que o reator tinha um fator de qualidade de 200, que é um valor mediano para elementos que irão operar continuamente.

Na figura 10 apresentam-se as curvas de tensão e potência consumida na carga rural com o uso do reator de sintonização. Foi analisada também a influência do carregamento da linha de transmissão no atendimento da carga rural. A carga rural foi variada até 1 MW para se observar a regulação de tensão no atendimento. Os valores de tensão e potência na carga, embora sejam menores com níveis de SIL maiores, não tem uma variação importante, o que quer dizer que não existe uma alteração da potência extraível em função da carga na linha de transmissão. O fenômeno capacitivo é mais forte do que o indutivo, sendo este desprezável.

Foi possível atender à carga desejada com uma regulação de tensão menor do que 4 %. Pode ser observado que devido à ressonância do sistema de alimentação a tensão eficaz no cabo PR (transversal em todo o cabo PR) e no reator de sintonização (longitudinal) para uma carga de 500 kW eleva-se a valores próximos de 70 kV. O valor da tensão nos cabos PR isolado era próxima de 30 kV para o sistema rural sem carga.

Ao se aumentar a carga no alimentador rural a tensão no cabo PR também aumenta. Este é um limitante da potência a ser suprida, uma vez que os cabos PR serão isolados para um nível de tensão especificado. Adicionalmente, o transformador do alimentador rural será dimensionado para uma determinada potência. Caso esta potência seja muito maior o transformador poderá operar na região saturada devido à elevação da tensão terminal, distorcendo a tensão da carga rural. A tensão na carga rural é muito limpa, sendo a sua qualidade função da qualidade da energia transportada na linha de transmissão.

C. Alimentador e energização da linha.

Para o transporte da energia a vilas afastadas da linha de transmissão foi instalado um transformador e um alimentador rural de 10 km até a carga, como se mostra na figura 11. Foi utilizado um transformador monofásico de 800 kVA com uma relação de transformação de 28 kV-8 kV, impedância de curto-circuito de 0,09 pu e um fator de qualidade de 100. A configuração transversal da linha rural tem uma altura de 12 m com uma cruzeta de madeira de 13,8 kV de 2,5 m comprimento. Foi usado um cabo 4/0 AWG de resistência $0,1610 \Omega/\text{km}$.

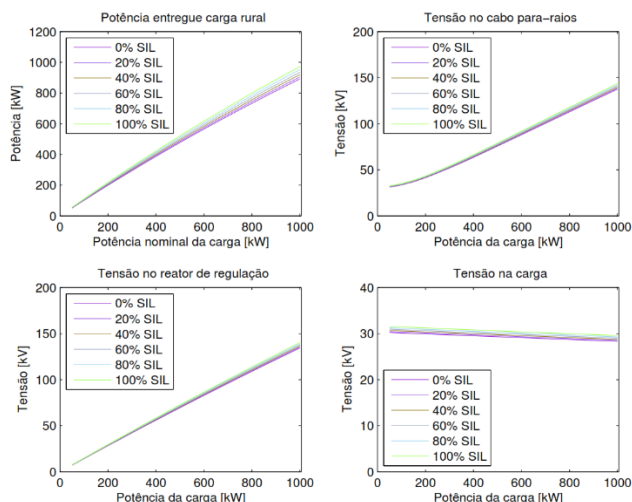


Figura 10. Potência e tensão eficaz no cabo PR, no reator de sintonização e na carga rural com variação da carga no terminal 200 km para diferentes valores de carregamento da linha de transmissão.

Como método de proteção do reator de sintonização assim como do alimentador em geral foi instalado um *gap* em série com uma resistência e o conjunto em paralelo com o reator. A resistência foi dimensionada para que o disjuntor descarregasse em 1 s, sendo o seu valor de 58Ω . Adicionalmente, foram colocadas hastes centelhadoras em paralelo aos isoladores do cabo PR. As tensões de ruptura para os *gaps* do reator e dos isoladores do cabo PR foram de 150 kV e 210 kV, respectivamente.

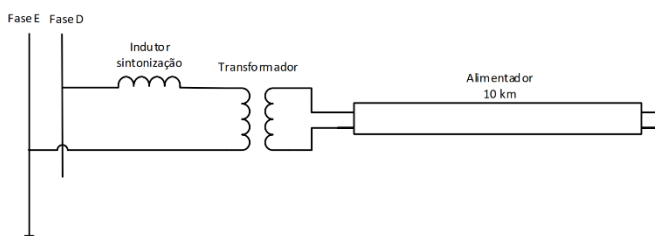


Figura 11. Configuração do alimentador simulado.

Foi realizado um extenso estudo de transitórios eletromagnéticos para avaliar o comportamento do sistema durante a ocorrência de manobras típicas da linha de transmissão e do alimentador rural. Um dos casos simulados consistiu na energização da linha de transmissão supondo o alimentador rural ligado a uma carga de 500 kW. Devido à característica aleatória da manobra de energização foi utilizada uma chave estatística para representar o fechamento dos polos do disjuntor, tendo sido simulados 100 disparos. Como método de mitigação foi suposto o uso de resistor de pré-inserção de 400Ω no disjuntor da linha de transmissão.

A Tabela III mostra os resultados do estudo estatístico. Verifica-se que não existe uma sobretensão importante no cabo PR, assim como no reator de sintonização.

A figura 12 mostra o caso determinístico do maior valor de tensão no terminal 200 km do cabo PR. As tensões ao longo do alimentador rural não apresentam nenhuma sobretensão importante. É importante destacar que a tensão na carga não apresenta distorções durante a manobra.

TABELA III. RESULTADO DO ESTUDO ESTATÍSTICO DA ENERGIZAÇÃO DA LINHA COM O ALIMENTADOR LIGADO SEM PROTEÇÃO.

	V cabo PR [kV]	Ddp reator [kV]	V Carga rural [kV]
Mínimo	121,81	104,70	11,09
Máximo	132,80	115,75	12,72
Média	126,42	108,80	11,76
Desvio padrão	2,11	1,90	0,33
Acima de 98 %	130,76	112,69	12,44

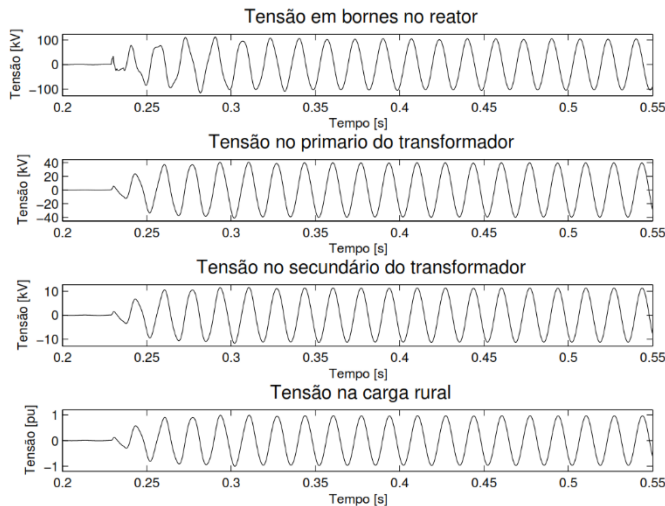


Figura 12. Tensões entre os terminais do reator, no primário do transformador, no secundário do transformador e junto da carga rural para energização da linha supondo o alimentador já conectado.

D. Desempenho do cabo para-raios isolado para descargas atmosféricas.

Normalmente os cabos para-raios nas linhas de transmissão estão aterrados ao longo do comprimento. Nesta proposta de alimentação da carga rural um dos cabos PR foi isolado.

Para manter a função básica de proteger a linha contra descargas atmosféricas foram instaladas hastes centelhadoras (*gaps*) em paralelo ao isolador de suporte do cabo PR. O potencial do cabo PR é muito pequeno comparado com a tensão do raio que atinge a linha, então é esperado que a eficiência da blindagem do cabo PR não seja reduzida. Quando a descarga atmosférica cair no cabo PR ou na torre, as hastes centelhadoras mais próximas fecharão o arco elétrico, levando aquela energia a terra [12]. Após a extinção do arco o cabo PR voltará a ser isolado.

Uma análise do sistema da função do cabo PR será apresentada em trabalhos futuros.

V. CONCLUSÕES

O uso de cabo para-raios isolados como método de fornecimento de energia elétrica para pequenas cargas foi apresentado no presente artigo. Foi utilizada como premissa que a carga base seria de 500 kW, o que corresponderia a uma vila rural de 250 casas, permitindo concluir que:

- É necessário o uso de equipamentos auxiliares devido à alta impedância em série da fonte de tensão induzida para gerar uma energia com boa regulação;

- A tensão induzida nos cabos PR dependerá da tensão e da geometria da linha de transmissão, não sendo função do comprimento de cabo isolado;
- Foi verificado que a potência de saída será função do comprimento do trecho de linha isolado e é necessário utilizar trechos que não envolvam uma torre de transposição;
- Usando um reator de sintonização como método de regulação de tensão pode-se atender à carga desejada através de diferentes configurações de conexão dos cabos PR;
- Um único cabo para-raios isolado com um comprimento de 100 km foi identificada como a melhor configuração para fornecer a potência para a vila hipotética;
- A variação do carregamento da linha de transmissão tem uma baixa influência na tensão induzida, podendo ser desprezada;
- A manobra de energização da linha de transmissão usando resistor de pre-inserção não produz sobretensões importantes no alimentador;
- As tensões ao longo do alimentador apresentam uma forma de onda limpa sem harmônicos. A qualidade da energia entregue será função da qualidade da energia da linha de transmissão.

Em trabalhos futuros mais resultados do estudo de transitórios serão apresentados.

REFERÊNCIAS

- [1] J.E. Ramos, A. Piantini, V. A. Pires, e A. D'Ajuz. The Brazilian experience with the use of the Shield Wire Line technology (SWL) for energy distribution. *IEEE Latin America Transactions*, v.7, n.6, 2009.
- [2] R. Vazquez-Arnez, M. Masuda, J. Jardini, e E. Nicodem. Tap-off power from a transmission line shield wires to feed small loads. *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Sao Paulo, Brasil, 2010.
- [3] R. Karhammer, A. Sanghvi, E. Fernstrom, M. Aissa, J. Arthur, J. Tullock, I. Davies, S. Bergman, e S. Mathur. Sub-Saharan Africa: Introducing Low Cost Methods in Electricity Distribution Networks. *ESMAP Technical Paper 104/06*, (Outubro), 2006.
- [4] F. Iliceto, F.M. Gatta, S. Lauria, M. Debebe, e M. Hussien. Rural Electrification in Ethiopia with the Schield Wire Scheme. *18th International Conference on Electricity Distribution* Turim, Italia, 2005.
- [5] M. Chaves. *Uma contribuição ao estudo da utilização de técnicas não convencionais para o suprimento de pequenas cargas nas proximidades das linhas de transmissão de alta tensão*. Tese de Doutorado, UNICAMP - Campinas, Brasil, 1995.
- [6] F. Llanos Sifuentes. Uso de la energía en el cable de guarda como alternativa de alimentación de pequeñas cargas. *Comision 2: Energia y uso racional de Recursos* Lima-Peru, 1981.
- [7] N. Fall, L. Giles, B. Marchionini, e E. Skolnik. Remote Area Power Supply (RAPS) Load and Resource Profiles A Study for the DOE Energy Storage Program. *Technical Report*, 2007.
- [8] MDA Pesquisas; Ministério de Minas e Energia. Impactos do Programa Luz para Todos - 15 Milhões de pessoas atendidas, 2013.
- [9] M. A. Di Lascio e E. J. Fagundes Barreto. *Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira: Eletrificação de Comunidades Isoladas*. Kaco Gráfica e Editora, Brasília, 1 edition, 2009.
- [10] Hermann W. Dommel. *EMTP Theory Book*, 1996.
- [11] R. C. Monzani, A. J. Prado, S. Kurokawa, L. F. Bovolato, e J. Pissolato. Eigenvalue analyses for non-transposed three-phase transmission line considering non-implicit ground wires. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, EUA, Julho 2012.
- [12] F. Iliceto, E. Cinieri, L. Casely-Hayford. New concepts on MV Distribution from insulated shield wires of HV lines. *Outubro*, 4(4):2130-2144, 1989.