



Análise dos Métodos Alternativos de Alimentação de Pequenas Cargas Através de Linhas de Transmissão

Sheyla Rodrigues Rabelo¹, Alan Magalhães Braga¹, Pedro Klecius Farias Cardoso²

¹Alunos do curso de Mecatrônica Industrial – IFCE. Bolsistas do CNPq e-mail: sheyla.rabello@gmail.com, alan_mbraga@hotmail.com

²Professor Doutor do Departamento de Telemática - IFCE. E-mail: klecius@ifce.edu.br

Resumo: Um dos desafios tecnológicos atuais é a otimização do uso da energia elétrica e a busca por sistemas alternativos de alimentação de cargas. O fato da energia elétrica ainda não estar presente em todos os municípios do Brasil fez com que alguns sistemas baseados na extração de energia através das linhas de alta tensão fossem implantados no país como alternativas não convencionais para algumas comunidades estão distantes das linhas de transmissão. Nesses casos seria inviável a instalação de uma subestação para alimentar as cargas dessas regiões. Decorrente a isso, as tecnologias baseadas na indução eletromagnética, sobretudo os acoplamentos, que extraem energia elétrica entre os condutores das linhas de transmissão e um condutor isolado, surgiram como uma das soluções. Essas tecnologias também podem ser úteis em aplicações em pequena escala, e podem ser utilizados na alimentação de alguns aparelhos ao longo da linha de transmissão. Esses dispositivos, que podem ser de uso da concessionária, precisam de baixa tensão disponível ou um transformador abaixador exclusivo para o seu funcionamento.

A extração de energia através das linhas de alta tensão já é usada em alguns países, porém com um rendimento questionável para a alimentação de grandes cargas. Com isso, estudam-se meios alternativos para a alimentação de pequenos dispositivos ou sistemas usados pela concessionária (aparelhos de telemedição ou um dispositivo que se reporte a concessionária sobre a algum defeito ou informação da linha através de sensores). Aparelhos esses que também são utilizados em regiões remotas onde a baixa tensão não está disponível. Neste trabalho foram listadas algumas das tecnologias não convencionais, sua viabilidade, quantidade de potência extraível dentro das regras estabelecidas pela concessionária e pelas agências reguladoras.

Outros aspectos como: características das linhas, médio de custos e o valor da carga que se deseja alimentar deve ser considerada na escolha dos melhores métodos.

.Palavras-chave: Acoplamento magnético, Acoplamento capacitivo, Cabo pára-raios, *WiTricity*

1. INTRODUÇÃO

O sistema de alimentação através de extração de energia das linhas de energia elétrica para equipamentos que necessitam de baixa potência podem ter maior utilidade nas linhas de transmissão e em regiões onde a baixa potência não está disponível e é inviável a instalação de um transformador dedicado a esse sistema, por exemplo, em regiões rurais. A utilização do campo eletromagnético produzido pela linha de distribuição para a extração de energia para ser utilizada como fonte de alimentação tem como base o princípio da indução eletromagnética.

Diversos aparelhos de telemetria são colocados ao longo das linhas de distribuição e transmissão e são usados para detecção de falhas que podem provocar a descontinuidade do fornecimento de energia. O uso de tais aparelhos agiliza a manutenção das linhas, diminuindo os períodos de interrupção de fornecimento (FERNANDES ROCHA, 2005). Alguns desses dispositivos encontram-se em regiões onde a baixa tensão não está disponível e que seria inviável a instalação de um transformador exclusivo para esse aparelho. Tendo em vista isso, estudam-se meios alternativos que possam fornecer de alguma maneira a tensão necessário para o funcionamento desses equipamentos. Além das células fotovoltaicas, as tecnologias baseadas no acoplamento magnético e acoplamento indutivo passaram a serem consideradas para suprir a ausência de baixa tensão.

Neste trabalho será discutida a viabilidade das tecnologias já existentes para obtenção de energia do campo eletromagnético produzido pela própria linha de distribuição, através de

acoplamento magnético, no intuito de se obter um sistema de alimentação prático, barato e simples de ser instalado.

A tecnologia de acoplamento consiste em manter uma bobina ou mesmo um conjunto de bobinas em série dispostas paralelamente às linhas de transmissão de energia elétrica. Essas bobinas devem ser induzidas através da tensão das linhas devido à proximidade das mesmas.

A tensão obtida na bobina deve ser maior que a tensão de saída para o sistema de alimentação, ou seja, da tensão necessária para realizar a alimentação do dispositivo. Essa tensão deve ser retificada para obtermos uma tensão usual como, por exemplo, o valor de 5V. Já para obter-se a potência desejada deve-se fazer dimensionamento da bobina utilizada entre outras especificações.

As tecnologias não convencionais de transmissão de energia elétrica vêm sendo estudadas e avaliadas, entretanto ainda há dúvidas quanto à utilização correta em cada caso. A questão do rendimento e potência máxima extraível é um dos pontos mais importantes ao optar por um sistema de transmissão de energia (FERNANDES ROCHA, 2005). Alguns métodos não convencionais de obtenção de energia através de um condutor não pertencente às linhas de transmissão são os seguintes:

- Acoplamento Capacitivo
- Cabo pára-raios isolado e cabo pára raios com otimização capacitiva.
- Acoplamento Indutivo
- Acoplamento Indutivo Ressonante ou *WiTricity*

Os métodos serão discutidos a seguir quanto a suas aplicações.

2. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS

A construção do método utilizada na pesquisa partiu da análise das tecnologias disponíveis atualmente. A maioria é derivada das técnicas de extração de grandes potências como aquelas utilizadas para suprir o consumo de comunidades onde não há baixa tensão. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre as principais tecnologias não convencionais que podem ser empregadas para a alimentação de dispositivos de baixa potência.

O estudo utilizou-se do equacionamento já existente para realizar alguns cálculos para obtenção de distâncias máximas e mínimas entre a linha de transmissão. A distância mínima do sistema deve obedecer às normas impostas pela concessionária calculada para evitar a geração do arco elétrico ou qualquer outro problema de interferência na rede. Neste caso, o sistema deve permanecer a uma distância mínima das linhas de acordo com as normas das concessionárias. Geralmente são 100 cm, mas vai depender da tensão na rede (NORMAS COELCE, 2005). Já a distância máxima deve ser calculada para não comprometer no valor da tensão desejada. Um esboço representando o acoplamento magnético citado alguns dos vetores envolvidos pode ser visto na figura 1.

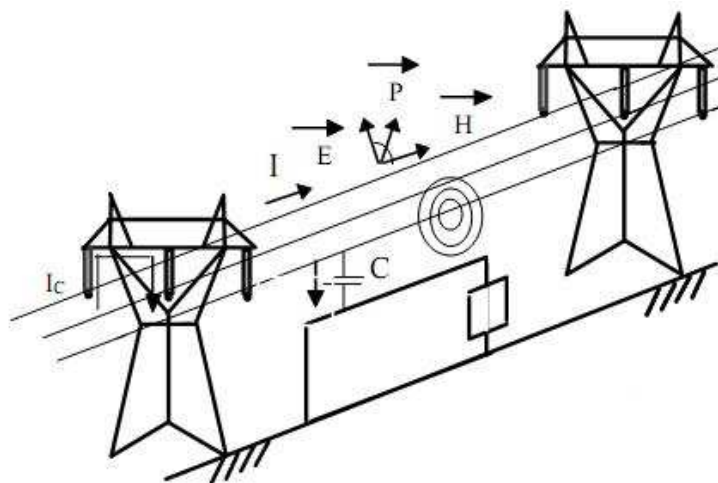


Figura 1 Exemplo de acoplamento magnético abaixo das linhas de transmissão.



2.1. WiTricity

WiTricity é a técnica mais nova dentre as estudadas, entretanto o seu uso em linhas de transmissão ou distribuição ainda não está bem definido. A tecnologia consiste em manter as duas bobinas na mesma frequência, ou seja, em ressonância. Nesse caso, uma bobina seria representada pelas linhas de transmissão e outra pela bobina propriamente dita montada em uma estrutura abaixo das linhas referidas. A frequência das linhas de transmissão é dita de baixa, que a princípio é incompatível com a frequência de melhor rendimento do sistema de energia sem fio em torno de 10MHz (GONDIM, 2010). Ou seja, seria necessário que os condutores, tanto a linha quanto a bobina estivessem com suas frequências ajustadas em torno de 10MHz. Nesse caso o controle da frequência ainda não está disponível para consulta em trabalhos anteriores. E teoricamente o controle dessa tecnologia através de módulos controladores de frequência é mais facilmente dimensionado em redes de baixa tensão. Atualmente a tecnologia é empregada em ambientes domésticos para carregamento de baterias.

2.2. Acoplamento Capacitivo

O acoplamento capacitivo pode ser utilizado para essa aplicação com restrições. A bobina do sistema deve estar disposta paralelamente a linha, porém com um dos seus terminais isolados. A bobina recebe a ação indutiva de todas as linhas condutoras e também do neutro.

2.3. Cabo pára-raios isolado

A tecnologia do para raio isolado pode ser de duas maneiras: energizado (PRE) e isolado (A.C) que são tecnologias antigas já utilizadas em diversos países, mas que precisam de grandes tensões nas linhas para obtenção de potência extraível considerável. Por exemplo, em um sistema de 161 KV foi possível a extração de 5MV de potência (SCHROEDER, 1996). Devido a natureza capacitiva da tensão induzida seu valor também não tem relação com o tamanho do cabo utilizado. Além disso, a tecnologia em questão exige a instalação de equipamentos que mantenham a tensão dentro dos níveis requeridos, ou seja, indutores em série ou mesmo em paralelo para fazer a regulação dos níveis de tensão exigidos. As implantações desses sistemas são bastante onerosas que leva a crê que a instalação de um módulo de alimentação em pequena escala possa superar os gastos da utilização de um transformador. Ou seja, esses sistemas direcionados a extração de pequenas potencias são inviáveis.

2.4. Acoplamento Indutivo

O acoplamento indutivo ou magnético pode ser utilizado para essa aplicação também com restrições. Da mesma maneira que o método do acoplamento capacitivo, a bobina do sistema deve estar disposta paralelamente a linha, porém com um dos seus terminais isolados. A bobina recebe a ação indutiva de todas as linhas condutoras e também do neutro. Diferentemente das tecnologias do para raios, o método do acoplamento seja ele indutivo ou mesmo o acoplamento capacitivo não exigem a instalação de equipamentos extra nas linhas para fazer regulação direta. Equipamentos esses que oneram a tecnologia.

2.5. Análise das tecnologias não convencionais

Após analisarmos os principais métodos, foram descartados dois deles: *wiTricity* e cabo pára-raios isolado devido à natureza da aplicação. Considerando o objetivo do projeto, as técnicas do acoplamento capacitivo e acoplamento indutivo não-ressonante foram as tecnologias mais adequadas para a aplicação de um sistema de alimentação para dispositivos de telemedicação, ou similares, colocados ao longo da linha que necessitam de baixa tensão e potência para o seu correto funcionamento.

O acoplamento capacitivo pode ser utilizado para essa aplicação com restrições. A bobina do sistema deve estar disposta paralelamente a linha, porém com um dos seus terminais isolados. A bobina recebe a ação indutiva de todas as linhas condutoras e também do neutro.

A tabela 1 relacionamos os métodos estudados no caso de extração de energia da linha e seus respectivos parâmetros tais como distância, potência extraível e aplicação.

Tabela 1- Tecnologias não-convencionais de alimentação de energia e seus parâmetros.

Tipo	Distância	Potência Extraível	Observações	Exemplos de uso
Acoplamento Capacitivo	Paralelo a linha com uma extremidade isolada	Alguns kW	Indutores de altos valores são requeridos.	Alimentação de aparelhos próximos a linha de distribuição e alimentação.
Cabo pára-raios isolado	Paralelo a linha e/ou energizado	Vários kW	Alto custo de implantação	Alimentação de comunidades distantes das linhas de distribuição
Acoplamento Indutivo	Paralelo a linha	Alguns MW	Altas correntes são exigidas ou um grande número de espiras.	Alimentação de aparelhos próximos a linha de distribuição e alimentação.
Acoplamento Indutivo Ressonante ou <i>WiTricity</i>	Poucos metros	Poucos W	Frequência na ordem de MHz	Carregamento de baterias de equipamentos domésticos

O cálculo das capacitâncias equivalentes entre as fases a, b, c e o neutro também deve ser determinado e um circuito equivalente deve ser montado como mostra a figura 2.

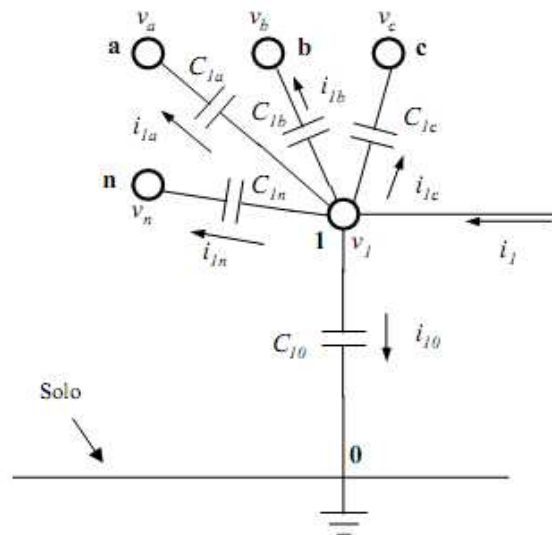


Figura 2. Circuito equivalente de um sistema de extração por acoplamento capacitivo (1) em uma linha trifásica (a, b, c e neutro).

A partir desse circuito, considera-se a resistência do sistema menor que a reatância capacitiva, ou seja, as correntes nos capacitores serão consideradas constantes, segundo (TORRES, 1986). E em todos os casos não são consideradas em nenhum momento que o sistema de extração afete a linha.

A potência máxima extraída pode ser determinada após a verificação da geometria das linhas de transmissão e depois da determinação dos circuitos equivalentes. A determinação dos ângulos das fases é de suma importância esse cálculo que tem natureza fasorial, como mostra a equação a seguir.

- $P_{max} = \frac{|V|^2}{4R_S}$



$$P_{max} = \frac{|V|^2}{4R_s}$$

- P_{max} = Potência máxima extraível
- V= Tensão da linha
- R_s = Resistência do sistema

Segundo o equacionamento já existente (SCHROEDER, 1996), não são considerados a resistividade do solo e a interferência do sistema nas linhas. O comprimento da linha é considerado como infinito para efeito de cálculo. No entanto devem ser considerados todos esses parâmetros para uma maior aproximação dos resultados reais no dimensionamento do módulo de alimentação através de compensação física, sobretudo, no tamanho dos diâmetros dos condutores da bobina, o que não será focado neste trabalho.

As definições matemáticas e os coeficientes de acoplamento capacitivo ou fator de acoplamento capacitivo e a sua relação entre os circuitos primário e secundário podem ser encontrados em (SCHROEDER, 1996) e essas equações são de grande importância na determinação para a aplicação no sistema de energia transferida através de indução.

Porém, há um grande inconveniente na aplicação do sistema capacitivo, sobretudo em relação à exigência de indutores de altos valores o que independe do comprimento do condutor isolado (bobina). Com essa consideração, não é possível desconsiderar a alteração da linha de transmissão por essa carga adicional. Em trabalhos posteriores, são relatadas que a utilização do acoplamento capacitivo e indutivo (FERNANDES ROCHA, 2005), foi possível fazer a compensação dos diâmetros da bobina e obter uma potência extraível de cerca de 20 Watts. Considerando essa baixa potência extraída e a o custo com instalação de indutores de valores altíssimos para suportar a alta tensão a aplicação a princípio torna inviável para um sistema com o número de espiras pequeno (CHAU LUI, 2010).

3. DISCUSSÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS

Para resultados precisos em relação à potência requerida, deve-se considerar que qualquer alteração da tensão das fases das linhas e qualquer tipo de oscilação na mesma podem acarretar no desbalanceamento dos resultados, assim como outros tipos de falhas. Além da escolha do sistema alternativo correto, deve-se por um sistema conversor para alimentação do sistema, regulação e recarga de baterias necessárias para o módulo.

Os modelos matemáticos das tecnologias discutidas neste trabalho já foram formulados anteriormente e são desconsiderados diversos aspectos e parâmetros que poderiam modificar os resultados finais desses sistemas, tais como:

- O tamanho real da linha de transmissão que para efeito de cálculo é aceita como infinita;
- A alteração na linha de transmissão em relação à presença do equipamento com carga;
- A resistividade do solo que a efeito de cálculo é tida como zero ou infinita;
- Fenômenos com a irradiação, tendo em vista a frequência da rede ser baixa também costumam ser desconsideradas.

A diferença entre o uso do acoplamento indutivo magnético e do acoplamento capacitivo consiste no fato da escolha da configuração física da bobina e da sua montagem na infraestrutura das linhas de transmissão. Se o condutor induzido for isolado do solo, ele apresentará características capacitivas e serão utilizados os conceitos de acoplamento capacitivos. Se o condutor induzido tiver contato com o solo predominam-se as características magnéticas, ou seja, indutivas. No entanto o acoplamento capacitivo apresenta uma maior dificuldade em relação à regulação do sistema no tocante à tensão.

No acoplamento indutivo as considerações a fazer são basicamente as mesmas do sistema capacitivo, assim como a base das suas equações de potência extraível que podem ser encontradas em (SCHROEDER, 1996). A bobina ou o conjunto de bobinas dispostas em série também sofrem com a



ação de todas as fases e inclusive do neutro da rede, porém com um dos seus terminais isolados. Como a potência a ser extraída é pequena comparada àquela transmitida pela linha, assume-se que as correntes de linha não são significativamente afetadas pela presença do equipamento e podem ser representadas por fontes de corrente. A regulação da tensão do sistema pode ser tratada mais facilmente neste caso do que no acoplamento capacitivo nesse caso

O circuito equivalente também teve que ser considerado para o cálculo das indutâncias próprias e mútuas e pode ser montado considerando os elementos básicos além da indutância, o fluxo (BASSEL, 2003). A potência máxima extraível obedece à mesma equação expressa anteriormente.

As espiras podem ser dispostas em série ou em paralelo abaixo das linhas da fase respeitando a distância mínima. Essas quando estão conectada série à corrente no sistema praticamente permanece a mesma. Quando estão em paralelo ele funcionará como um somador de potência.

Para a efetiva instalação de um sistema baseado nessas tecnologias seriam necessários mais alguns passos e determinações de valores:

- Comprimento da bobina e quantidade de espiras;
- Diâmetro da espira;
- Valor da tensão através do teorema de Thévenin;
- Cálculo da indutância própria;
- Cálculo da indutância mútua.

Diferentemente das tecnologias do para raios, o método do acoplamento seja ele indutivo ou capacitivo não exige a instalação de equipamentos extra nas linhas para fazer regulação direta. Equipamentos esses que oneram a tecnologia.

A verificação de todas as possíveis ocorrências de fenômenos intrínsecos às linhas de transmissão também devem ser incluídas nos cálculos e equações sugeridas em trabalhos posteriores tais como a ocorrência de arco elétrico, descargas atmosféricas e possíveis curtos-circuitos. Essa avaliação poderia trazer uma maior confiabilidade ao sistema de alimentação através de acoplamento magnético.

O acoplamento magnético ou indutivo como métodos alternativos em um sistema de alimentação seria viável apenas se próximos a redes de transmissão com corrente altas, maiores que 15A. Abaixo disso, o número de espiras da bobina deveria ser alterado para que possa ser extraída a potência desejada. No acoplamento indutivo, essa relação é mantida com o acréscimo de indutores.

4. CONCLUSÕES

Os métodos de acoplamento indutivo e capacitivo simples foram as opções mais viáveis para a solução do problema proposto. No entanto, essas tecnologias podem ser aplicadas com algumas restrições e dificuldades como a compensação das correntes através do acréscimo de outros componentes que tornaria o projeto mais oneroso. Para o uso da tecnologia do acoplamento magnético sugere-se a continuidade dos estudos focando, sobretudo na proteção do sistema de extração para operação em sistemas em escalas reais para que possa ocorrer a implantação do mesmo. A utilização do acoplamento indutivo como método alternativo em um sistema de alimentação seria viável apenas se próximos a redes de transmissão com corrente altas, maiores que 15A. Abaixo disso, o número de espiras da bobina deveria ser aumentado para que possa ser extraída a potência desejada. Nesse caso, essa relação é mantida com o acréscimo de indutores. Ou seja, para correntes de menor intensidade, abaixo de 15A, uma das soluções seria um tratamento no material que constitui as bobinas para que o aumento de números de espiras não seja necessário.

Na aplicação do sistema capacitivo, também sofre com quedas no rendimento da potência extraível em casos de correntes baixas na linha e exige indutores de altos valores, o que independe do comprimento do condutor isolado (bobina). Considerando essa baixa potência extraída e a o custo com instalação de indutores de valores altíssimos para suportar a alta tensão a implantação do sistema, a princípio, se torna inviável para uma aplicação com o número pequeno de espiras.

Também não é possível desconsiderar a alteração da linha de transmissão por essa carga adicional. Outra consideração seria sobre a constituição da bobina. Quanto melhor a liga que constitui



a bobina mais facilmente induzível ela fica o que poderia reduzir as dificuldades encontradas. Uma rede com correntes abaixo de 15A, por exemplo, poderia utilizar essas novas bobinas e que a quantidade de espiras seria relativamente reduzida e o sistema teria um rendimento mais próximo ao desejado mesmo com baixas correntes.

REFERÊNCIAS

BASSEL, SOUDAN. “The effects of swizzling on inductive and capacitive coupling for wide signal busses”. University de Sharjah, 2003, 4p.

CHAU LUI AND A.P. BUDHIA, M. “A generalized coupling model for capacitive power transfer systems” 36th Annual Conference on IEEE Industrial. 2010, 6p.

COELCE NORMAS TÉCNICAS disponível em : http://www.coelce.com.br/media/45355/coelce_normas_tecnicas_20050819_283.pdf, acesso em 07 de julho de 2012.

FERNANDES ROCHA, FABIANO. Avaliação e projeto de uma fonte de energia para sistema de detecção de faltas em redes de distribuição rurais. Dissertação (mestrado) 2005, 173p.

GONDIM, P. FELIPE. “Transmissão de energia elétrica sem fio” Universidade Federal do Ceará, 2012, 53p.

SCHROEDER, M. A. de O. “Concepção de um sistema para extração de energia elétrica de linhas de transmissão através de acoplamento magnético” Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1996, 131p.

TORRES, G. L. “Análise de problemas típicos na extração de pequenas potências por efeitos eletromagnéticos nas proximidades das linha elétricas de alta tensão” Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986, 121p.