

Sistemas de transmissão e a transmissão a longa distância: conceitos básicos

ÂNGELO VIAN

Diretor-Executivo da Themag Engenharia. Engenheiro eletrônico com láurea em Engenharia Eletrotécnica pelo Politécnico di Milano — Itália, 1961; foi chefe de Divisão e chefe do Departamento dos Estudos de Redes Elétricas do Centro Eletrotécnico Sperimentale Italiano em Milão, Itália; foi professor de cursos de pós-graduação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, engenheiro-chefe do Departamento de Estudos de Sistemas Elétricos e Diretor Operacional da Diretoria de Estudos de Sistemas Elétricos da Themag.

O trabalho aborda, em termos gerais, os sistemas de transmissão de energia elétrica em vários de seus aspectos mais importantes, sob os pontos de vista técnico e econômico. Relativamente a este último, procura-se dar um panorama amplo do problema, considerando-se sempre duas alternativas de geração de energia elétrica: localmente, junto aos centros de consumo, ou remotamente, onde se verifica a existência de recursos energéticos exploráveis a baixo custo.

Sem se aprofundar em nenhum dos tópicos abordados, oferece-se uma visão geral sobre a estrutura de um sistema elétrico de potência, sobre sistemas elétricos isolados e interligados e sobre alguns aspectos operativos de uma rede elétrica. Também são abordados os tipos básicos de transmissão (em corrente alternada e em contínua). Um enfoque especial é dado à transmissão a distâncias extremamente longas (acima de 1000 km), aqui designada por "muito longa distância", associados de interesses, exemplos envolvendo o sistema elétrico nacional brasileiro são mencionados.

1. Introdução

Restrições de ordem técnica, econômica e ambiental tornam praticamente impossível, pelo menos nos dias de hoje, gerar nos próprios locais de seu uso toda

a energia elétrica necessária para alimentar os grandes centros comunitários. Além disso, raramente se encontram nos locais ou nas proximidades dos locais de consumo as fontes e/ou recursos energéticos (tais como: carvão, óleo, quedas d'água, etc.), cujas disponibilidades fundamentais impõem a localização das centrais de geração de energia.

Há, portanto, a necessidade de se transferir a energia do local onde ela se encontra disponível (geração), seja ele remoto ou não, para o local onde será consumida. Muitas vezes, o meio mais prático e econômico é transmiti-la sob a forma de energia elétrica. Um exemplo típico e que ilustra bem essa situação é o relativo às usinas térmicas a carvão:

- a) situadas remotamente junto à mina de carvão, com transmissão da energia gerada através de linhas elétricas, ou
- b) situadas nas proximidades do centro consumidor, local até onde seria transportado o carvão.

Dependendo do montante de potência envolvida, a alternativa "a" tenderá a ser mais atraente do que a outra, apresentando, sobretudo, vantagens econômicas. Vantagens econômicas desse tipo têm sido uma das razões importantes do grande desenvolvimento dos sistemas de transmissão de energia elétrica em todo o mundo. A principal, no entanto, é ditada pela exploração de grandes potências provenientes dos recursos hidráulicos, cujo aproveitamento necessariamente é feito no local onde eles existem, na maioria das vezes remotamente. Enquadra-se bem nessa situação o caso do Brasil, país de dimensões continentais e rico em recursos hidráulicos, o que propicia condições para se ter transmissão à longa distância (da ordem de 1000 km) e a muito longa distância (acima de 1000 km).

Concluindo, o problema da transmissão de energia elétrica, excluídos os aspectos de ordem ambiental e verificada a viabilidade técnica, resume-se em comparar economicamente o custo da transmissão, acrescido dos custos das partes da geração remota, com o custo da geração local (instalações e combustível).

Ou seja, o fator determinante é o custo final da energia entregue nos pontos de consumo.

Por outro lado, considerando-se os custos praticamente proibitivos do óleo combustível em países importadores de petróleo, a alternativa de geração local (junto aos grandes centros consumidores) tem como principal opção a de origem nuclear. Visando a minimizar os custos do seu sistema de transmissão, as usinas nucleares normalmente são situadas o mais próximo possível dos locais de consumo. Mas, ultimamente, no entanto, tais localizações estão sendo amplamente contestadas ou vivamente debatidas quanto a aspectos de segurança e conservação ambiental.

Abordados esses tópicos iniciais, os itens seguintes deste trabalho apresentam considerações sobre:

- sistemas elétricos de potência;
- interligação dos sistemas elétricos;
- alguns aspectos operativos de sistemas de transmissão;
- tipos de transmissão;
- transmissão a muito longa distância:
 - ★ progressos na tecnologia de transmissão (UAT);
 - ★ confiabilidade e seu custo;
 - ★ perspectivas nacionais.

2. Sistemas elétricos de potência

Ao conjunto das instalações e equipamentos que se prestam para a geração (conversão de uma dada forma de energia em energia elétrica) e transmissão de grandes blocos de energia dá-se o nome de sistema elétrico de potência. Ele é constituído basicamente pelos geradores, estações de elevação de tensão e chaveamento, linhas de transmissão e estações abaixadoras. Nessa rede elétrica, os grandes blocos de energia são transmitidos, normalmente, em alta ou extra-alta tensão e, a partir daí, se subdividem em blocos menores, os quais são injetados nas chamadas redes de subtransmissão, já em tensões médias. Finalmente, os pequenos consumidores individuais são alimentados por redes de distribuição em baixas tensões.

É interessante observar que as tensões das redes de distribuição (em torno de 11-14 kV) não diferem muito das tensões de geração, ou seja, mesmo modernamente, as grandes unidades geradoras têm tensões terminais da ordem de 20-25 kV ou abaixo, tensões estas limitadas por problemas construtivos das máquinas. No entanto, entre a geração e a distribuição existem sistemas de transmissão em EAT (extra-alta-tensão: 500-750 kV) ou em AT (230, 345 ou 440 kV) e de subtransmissão em 138, 88, 69 ou 34.5 kV. A razão disso é que é impossível transmitir diretamente, mesmo em distâncias modestas, a potência elétrica gerada nas usinas, pois as quedas de tensão e as perdas na transmissão seriam inaceitáveis. Esse aspecto é mais problemático quanto maior for a potência a ser transmitida, ou seja, quanto maior for a corrente elétrica. Considerando que, por questões econômicas, as tendências mais recentes têm sido as de construir grandes complexos de geração de energia (Ilha Solteira, Paulo Afonso, Tucuruí e Itaipu, no caso brasileiro) e cada vez localizados mais longe dos centros consumidores, é fundamental limitar as correntes elétricas em valores adequados. Isso é conseguido com a elevação da tensão, que é transformada da faixa de alguns kV, na geração, para níveis de algumas centenas de kV, na transmissão, através dos chamados transformadores-elevadores. No exemplo acima citado, as tensões de transmissão são 440 kV para Ilha Solteira, 500 kV para Paulo Afonso e Tucuruí e 750 kV para Itaipu. Tratam-se de linhas em corrente alternada (CA) que, individualmente, podem transportar potências na faixa de 700.000 kW (700 MW) a 2000 MW (os sistemas de corrente contínua - CC - são abordados no item 5).

Por outro lado, os consumidores requerem potências mais baixas do que essas, mesmo as grandes indústrias, que então são alimentadas em tensões inferiores às de transmissão. Para tanto, existem as estações abaixadoras, nas quais as tensões de transmissão são abaixadas para níveis compatíveis com as cargas que vão alimentar. Em particular, as pequenas potências de distribuição (linhas aéreas ou subterrâneas nas ruas ou avenidas) se adequam mais às baixas tensões, também necessárias por questões de segurança.

Portanto, sob o ponto de vista funcional e também operacional, vê-se que a estrutura de um sistema elétrico de

potência pode ser dividida em várias subestruturas, baseadas, sobretudo, nos seus diversos níveis de tensão.

3. Interligação dos sistemas elétricos

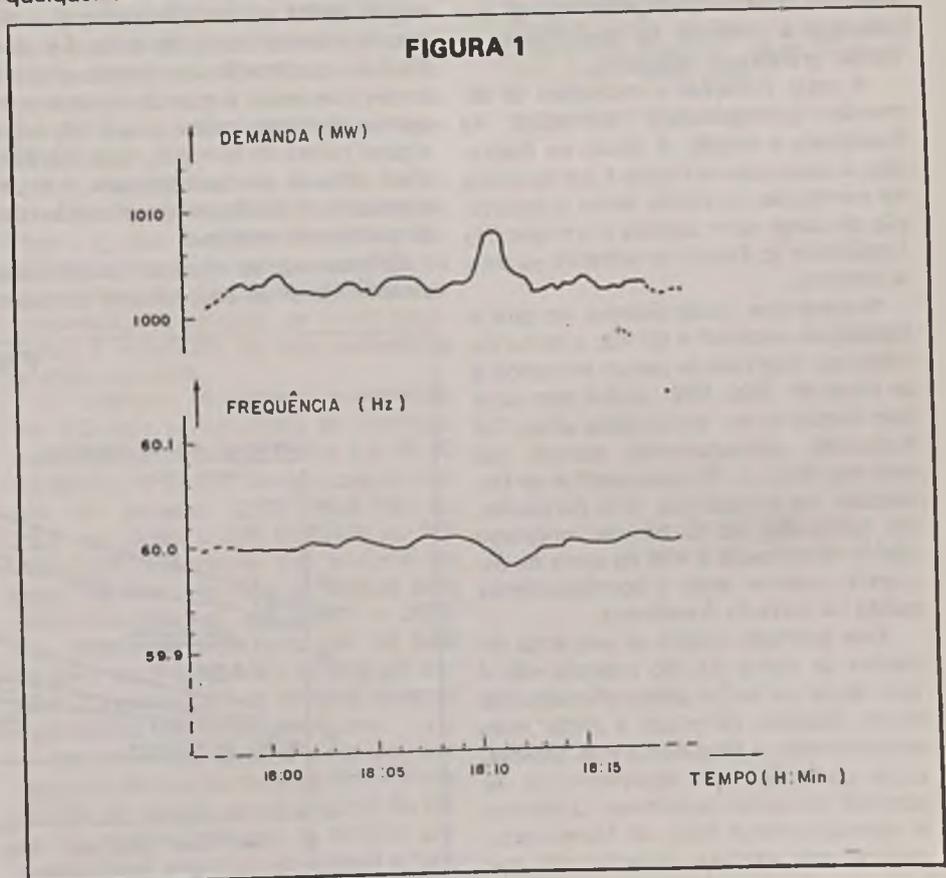
A explanação feita no item anterior sobre a estrutura "geração + transmissão + subtransmissão + distribuição" é geral: ela é aplicável a um simples sistema radial e isolado, isto é, uma usina conectada a uma ou mais cargas por meio de uma ou mais linhas de transmissão (LT), como também é aplicável aos chamados sistemas interligados.

A medida em que aumenta a demanda de energia, mais fontes necessitam ser exploradas e mais LT's necessitam ser construídas para conectar essas novas estações geradoras aos novos pontos de distribuição e também às estações já existentes, surgindo, assim, a interligação de sistemas. Se, por um lado, essas interligações implicam uma maior complexidade de operação do sistema como um todo, por outro são economicamente vantajosas, além de aumentarem a confiabilidade do suprimento às cargas. Imagine-se, por exemplo, um centro consumidor alimentado radialmente: qualquer falha na transmissão ou na ge-

ração pode prejudicar ou mesmo comprometer totalmente a sua alimentação, ao passo que se tal centro consumidor fizer parte de um sistema interligado existirão "caminhos" alternativos para o seu complexo suprimento.

As interligações de sistemas elétricos também podem propiciar um melhor aproveitamento das disponibilidades energéticas de regiões com características distintas. Como por exemplo, cita-se a interligação dos sistemas Sudeste/Centro-Oeste e Sul do Brasil: são sistemas predominantemente hidrelétricos, caracterizados por sensíveis diferenças de hidraulicidade de seus rios, isto é, não são coincidentes numa e noutras regiões as grandes vazões fluviiais. Dessa forma, através da interligação SE/CO-S pode-se fazer uma adequada troca de energia, sendo o superávit de uma exportado para a outra e vice-versa.

Relativamente aos sistemas isolados, outras vantagens das interligações não são tão evidentes, mas são bastante importantes sob o aspecto econômico: necessita-se de menos unidades geradoras de reserva para o atendimento dos picos de carga e menos máquinas nas usinas trabalhando em vazio (reserva girante) para atender os requisitos dinâmicos do



sistema, como, por exemplo, perdas de linhas de transmissão, aumentos súbitos de carga, etc....

4. Alguns aspectos sobre a operação de sistemas de transmissão

Desde os grandes motores industriais até os mais simples equipamentos eletrodomésticos, todos são projetados e construídos para trabalharem dentro de certas faixas de tensão e frequência, fora das quais podem apresentar funcionamento insatisfatório ou até mesmo se danificarem. Essas exigências básicas impõem, portanto, à operação dos sistemas elétricos, um adequado controle da tensão e da frequência na rede, a qual está sujeita as mais variadas solicitações. Essas solicitações, mesmo nas chamadas condições normais de funcionamento nas quais todos os elementos do sistema trabalham perfeitamente, mudam ano a ano, mês a mês e, o que é mais importante, variam muito durante um único dia (por exemplo, nos horários de pico — 18/20 horas — é muito grande a demanda no sistema, enquanto durante a madrugada ela cai aos seus valores mínimos). Além dessas variações razoavelmente bem previstas, existem outras mais ou menos aleatórias, como por exemplo a conexão ou desconexão de cargas, grandes ou pequenas.

A essas variações e oscilações de demanda correspondem alterações na frequência e tensão. A título de ilustração, é mostrado na Figura 1 um exemplo da correlação existente entre a solicitação de carga num sistema e a respectiva frequência (o fato é semelhante quanto às tensões).

Nota-se que, neste sistema, no qual a frequência nominal é 60 Hz, a demanda média no intervalo de tempo mostrado é de cerca de 1002 MW, porém com uma leve flutuação em torno desse valor. Tal flutuação, absolutamente normal nos sistemas reais, se faz acompanhar de flutuações na frequência. Em particular, em torno das 18:10 há um acréscimo rápido de cerca de 6 MW na curva de demanda; pode-se notar a correspondente queda na curva de frequência.

Esse exemplo mostra as pequenas variações de demanda. No entanto, não é raro ter-se variações proporcionalmente muito maiores, de modo a afetar mais sensivelmente a frequência e as tensões, cujas oscilações dos equipamentos de controle procuram minimizar. O controle normalmente é feito de forma automática, mas existem situações em que

há intervenção manual.

A frequência é controlada automaticamente nos próprios geradores através dos reguladores de velocidade, equipamentos que injetam mais ou menos água (ou vapor ou gás) nas turbinas que acionam as máquinas, dependendo do aumento ou diminuição da demanda.

O controle da tensão pode ser feito remotamente nas usinas, através dos reguladores automáticos de tensão, mas também pode ser efetuado a nível de transmissão, subtransmissão e/ou distribuição. De um modo geral, o controle remoto não é suficiente e o controle junto à carga é mais efetivo; automaticamente, se realiza por meio de condensadores síncronos ou compensadores de reativos estáticos controláveis e, manualmente, por meio de conexão ou desconexão de bancos de capacitores e/ou reatores em desativação.

Afora esses aspectos ligados a controle de tensão e carga/frequência, na operação das redes interligadas existe o problema de como distribuir-se as cargas entre as diversas usinas do sistema, nas diversas situações de demanda (máxima, média e mínima). À alocação dessa geração dá-se o nome de despacho de geração, de cujo estabelecimento depende muito a operação racional e eficaz do sistema como um todo. Em particular, a operação econômica dos sistemas nos quais é grande o número de usinas térmicas (como nos EUA e em alguns países da Europa), cujo combustível, sabe-se ser bastante caro, é extremamente dependente da alocação dos despachos de geração.

É interessante ressaltar também que existem sistemas automáticos de super-

visão e controle ou de despacho automático. O controle é feito por meio de computador, o qual monitora continuamente o carregamento das linhas de transmissão e os montantes gerados nas diversas usinas.

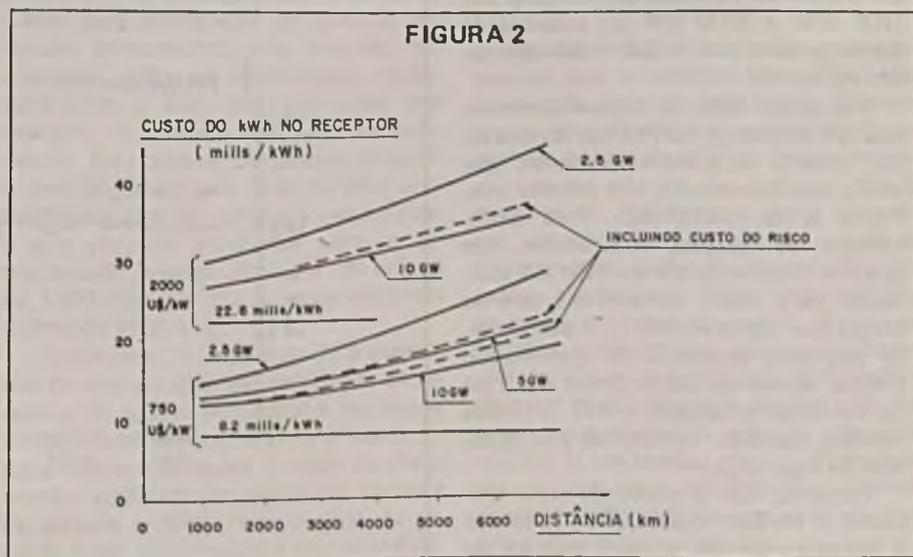
5. Tipos de transmissão: corrente alternativa (CA) ou contínua (CC)

Apesar de nos primórdios (final do século XIX) da eletricidade ter sido utilizada transmissão em corrente contínua(*), foi a transmissão em CA que apresentou um espetacular desenvolvimento desde então. A utilização da corrente alternada em grande escala deveu-se principalmente aos seguintes aspectos:

- As máquinas em CA, tanto geradoras como motoras, são equipamentos bem mais simples do que as correspondentes em CC, especialmente as polifásicas (trifásicas) de grande potência;
- o surgimento dos transformadores de potência, equipamentos estáticos (sem partes girantes) que tornaram possível a transmissão de energia em tensões bastante mais altas do que as de geração (ver importância desse fato no item 2 anterior).

Nesse contexto, os sistemas de transmissão em CA evoluíram e ainda continuam evoluindo muito, com emprego de tensões cada vez mais elevadas. No entanto, é reconhecidamente comprovado que as linhas de transmissão em CA são mais caras que as linhas CC, além do que a transmissão em CC é mais simples do que a CA. A partir de 1950/60, co-

FIGURA 2



meçaram então a surgir equipamentos (conversores CA/CC) que possibilitaram o aproveitamento das vantagens tanto da corrente alternada como da contínua, ou seja, geração e consumo permanecem em CA, sendo somente a transmissão feita em CC.

Os conversores são equipamentos estáticos que num dos terminais da transmissão (geralmente no lado gerador) retificam a corrente — conversão CA para CC — e, no outro, fazem a inversão CC para CA. Acontece no entanto, que as estações conversoras são ainda bastante caras, de modo que o conjunto "estação + linhas em CC" somente apresenta vantagens econômicas a partir de certas condições específicas, caracterizadas principalmente por transmissão a grandes distâncias. Para distâncias menores a transmissão CA ainda é economicamente mais atraente.

Outra característica importante de um elo CC é que o mesmo se constitui numa ligação assíncrona, isto é, as frequências dos lados CA do retificador e do inversor não necessitam ser iguais (restrição básica das ligações síncronas em CA). Assim, sistemas com frequência nominal de 50 Hz, como a das máquinas paraguaiás da ITAIPU Binacional, podem ser interligados com sistemas a 60 Hz, como o restante do sistema elétrico brasileiro. No exemplo acima citado, a potência transmitida pode ser considerada bastante grande (6300 MW), que correspondente à metade da capacidade instalada da usina de Itaipu, o mesmo não acontecendo com a distância, que é da ordem de 800/900 entre a geração e as imediações de São Paulo. No caso, a necessidade do elo assíncrono é ditada pelas frequências 50 Hz, no lado retificador, e 60 Hz, no inversor.

Também julga-se importante mencionar que as interconexões em CC, além de não aumentarem as potências de curto-circuito das partes interligadas, em muito podem contribuir para a operação estável dos sistemas.

6. Transmissão a muito longa distância

O aproveitamento a baixos custos de recursos energéticos disponíveis a muito longa distância dos centros consumidores pode se tornar competitivo, com conseqüência dos altos custos das fontes instaláveis próximas a esses centros e também como resultado dos recentes avanços na tecnologia de transmissão a ultra-alta tensão em CA (1000 kV e

acima), bem como da transmissão em CC. Com exemplos desse tipo de aproveitamento para produção de energia elétrica podem ser citados o rio Zaire (Inga), bacia do Amazonas, no Brasil, rios no Sudoeste da China, etc., além de minas de carvão situadas remotamente.

Conforme já mencionado anteriormente no item 1, a viabilidade econômica dos aproveitamentos remotos e baratos está condicionada unicamente ao custo da transmissão e das perdas, desde que a viabilidade técnica tenha sido alcançada.

Na transmissão a muito longa distância, um aspecto que passa a ter grande importância é o da confiabilidade do suprimento. É mais ou menos evidente que, à medida em que se aumenta a distância, aumenta os riscos de falhas na transmissão, sejam elétricas ou mecânicas. Assim, mais recentemente e visando a uma melhor comparação econômica do custo da energia entregue ao consumidor, entre as alternativas de geração local ou remota, passou-se a se levar em conta também o chamado "custo do risco" de falha. Isto é, são feitos estudos de confiabilidade, que envolvem tratamento probabilístico das falhas de geração e transmissão, resultando daí os níveis de expectativa de cortes de carga. Associando-se custos a esses níveis de energia não suprida, obtém-se os "custos do risco".

Para exemplificar essa situação foram extraídas da referência (a) as curvas da Figura 2, que também ilustram o aumento do custo da energia entregue ao consumidor em função da distância de transmissão. A unidade de custo considerada é mills/kWh, ou seja, milésimos de dólar por kWh.

O exemplo se refere à transmissão em CC para vários níveis de potência, com fator de utilização igual a 1.0 (8760 horas/ano) e a partir de dois custos básicos de geração: 2000 US\$/kW ou 22.8 mills/kWh e 750 US\$/kW ou 8.2 mills/kWh. Observa-se que o custo do risco torna-se significativo apenas para distâncias maiores que 2000 — 3000 km, tendo ele sido calculado na base unitária de 2 US\$/kWh de energia cortada e referido a um sistema receptor com 48000 MW de carga máxima.

De um modo geral, o custo do risco depende do montante de potência transmitida em relação ao valor global da carga do sistema receptor. A seleção adequada do(s) ponto(s) de entrega é também um item relevante a ser considera-

do para o dimensionamento da transmissão a longa distância.

Finalizando, quantificações de custo como essa apresentada acima permitem verificar sempre a viabilidade econômica da transmissão a muito longa distância e do aproveitamento dos recursos energéticos remotos. No caso brasileiro, caracterizado por dois grandes sistemas elétricos isolados entre si (N/NE e SE/CO/S), a transmissão entre Norte e Sudeste na distância de cerca de 2500 km, viável tecnicamente, pode ser competitiva economicamente. Para tanto basta fazer uma comparação análoga à da referência (a), considerando-se os custos da exploração hidrelétrica na Amazônia, acrescidos dos da transmissão até o Sudeste, com os custos, por exemplo, da instalação e combustível de usinas nucleares localizadas no próprio Sudeste.

(*) Inclusive, a geração era em CC, porém de pequenas potências destinadas basicamente à iluminação.

BIBLIOGRAFIA

- a) L. Paris, G. Zini, M. Valtorta, G. Manzoni, A. Invernizzi, N. de Franco e A. Vian, "Present Limits of Very Long Distance Transmission Systems", paper 37-12, CIGRÉ, Paris, França, 1984.