

Perdas energéticas em GTD

Um dos grandes desafios para o setor elétrico é a redução das perdas energéticas em geração, transmissão e distribuição, pois elas impactam não somente os consumidores, como toda a cadeia responsável pelo fornecimento de energia no país. A partir desta edição, teremos como mentor deste fascículo o engenheiro eletricista e professor adjunto da Universidade Federal do ABC, Joel David Melo Trujillo, que possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.



Capítulo 5

Perdas técnicas e não técnicas em transmissão e distribuição – Parte 1/2

*Por Haroldo de Faria Junior e Edmarcio Antonio Belati

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo para a revista O Setor Elétrico trata do importante tema de perdas elétricas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica e está dividido em duas partes. Na primeira parte, apresenta-se a definição de perdas elétricas e suas componentes (técnica e não técnica) e os valores dessas perdas no Brasil e em outros países. Também é mostrado como essas perdas são recuperadas pelos operadores dos sistemas elétricos. Na segunda parte, faz-se uma análise dos métodos e procedimentos disponíveis atualmente para a redução das perdas elétricas em sistemas de potência. Apresentam-se exemplos de redução de perdas técnicas em um sistema de distribuição através de uma simulação computacional, destacando os resultados obtidos.

Podemos definir um sistema de energia elétrica ou sistema de potência (SEP) como aquele que tem a função de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica para os consumidores da maneira mais econômica possível, com qualidade, confiabilidade e segurança. Essa definição de SEP é mais facilmente verificada na prática, principalmente durante a operação, em sistemas que possuem mecanismos e incentivos para reduzir suas perdas totais. As perdas de energia elétrica são um componente presente em todos os sistemas, resultante da transmissão e da distribuição de energia. Essas perdas são categorizadas em dois tipos: perdas técnicas e não técnicas. A seguir, são analisadas, com um pouco mais de profundidade, esses dois tipos de perdas.

1.1 - PERDA TÉCNICA

“Perdas técnicas” é um termo frequentemente utilizado em diversas áreas, como engenharia elétrica, industrial e telecomunicações, para descrever as perdas inevitáveis que ocorrem durante a transmissão ou transformação de energia. No contexto da transmissão e distribuição de energia elétrica, as perdas técnicas se referem à energia que é dissipada na forma de calor devido à resistência dos condutores, e da energia perdida nos transformadores e em outros componentes do sistema elétrico. Essas perdas podem ser divididas em Perdas por efeito Joule, Perdas por efeito Corona e Perdas Magnéticas.

1.1.1 - PERDAS JOULE

As perdas Joule, também conhecidas como perdas por efeito Joule ou perdas resistivas, ocorrem devido a passagem da corrente elétrica por um condutor e parte da energia elétrica é dissipada em forma de calor devido à resistência do material. Essas perdas são as principais causas de ineficiência em sistemas elétricos, especialmente em linhas de transmissão e distribuição. As Perdas Joule podem ser calculadas pela equação (1).

$$P_{\text{perdas}} = RI^2 \quad (1)$$

Em que: P_{perdas} : perdas em Watts [W]; R: resistência elétrica em Ohms [Ω] e, I: corrente em Ampères.

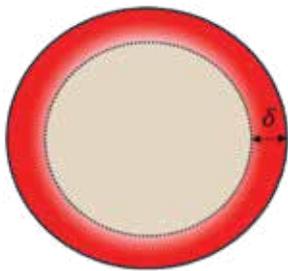
Analisando a equação (1), pode-se concluir que as perdas Joule são influenciadas pelos seguintes fatores:

- Corrente Elétrica (I): Quanto maior a corrente que passa pelo condutor, maiores são as perdas Joule.
- Resistência Elétrica (R): A resistência do material é um fator crucial. Materiais com alta resistência (como o aço) dissipam mais energia em forma de calor do que materiais com baixa resistência (como o cobre). A resistência R de uma linha de transmissão ou distribuição depende de alguns fatores:

✓ **Comprimento do Condutor:** A resistência total de um condutor é proporcional ao seu comprimento. Condutores mais longos têm maior resistência e, portanto, maiores perdas Joule.

✓ **Área da Seção Transversal:** Condutores com maior área de seção transversal têm menor resistência e, conseqüentemente, menores perdas Joule.

✓ **Efeito Skin:** Fenômeno pelo qual a corrente elétrica alternada (CA) tende a se concentrar na superfície de um condutor, em vez de fluir uniformemente por toda a sua seção transversal, o que provoca um aumento na resistência R do condutor, aumentando as perdas por Efeito Joule. Esse efeito se torna mais pronunciado à medida que a frequência da corrente aumenta, conforme equação 2, que determina a profundidade Skin (δ). A figura 1 mostra o efeito Skin para um condutor percorrido por uma corrente alternada.



$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2)$$

Figura 1 - Profundidade skin

Em que: δ é a profundidade de penetração em metros; ρ é a resistividade do material [$\Omega \cdot m$]; ω é a frequência angular da corrente ($\omega = 2\pi f$) [$\frac{rad}{s}$], sendo f a frequência da rede em Hertz e; μ é a permeabilidade magnética do material [H/m].

1.1.2 - PERDAS CORONA

Nas linhas de transmissão, também existem perdas devido ao chamado Efeito Corona. Esse fenômeno é uma descarga elétrica gerada pela ionização do ar nos arredores do condutor, que ocorre após exceder um determinado limite e em condições insuficientes para gerar um arco voltaico. Originado pelo campo elétrico da linha de transmissão, a energia liberada pela Corona representa uma forma de perda. As perdas por Efeito Corona em linhas com tensões muito elevadas podem variar de alguns kW/

km até várias centenas de kW/km, especialmente em condições climáticas adversas. Essa classe de perdas não pode ser totalmente eliminada com a tecnologia atual disponível. Conforme ilustrado na Figura 2, o Efeito Corona é uma descarga luminosa causada pela ionização do gás ao redor de um condutor elétrico, que também pode provocar ruídos. Além de causar perdas elétricas na rede, o Efeito Corona também interfere nos sinais de rádio e televisão próximos.



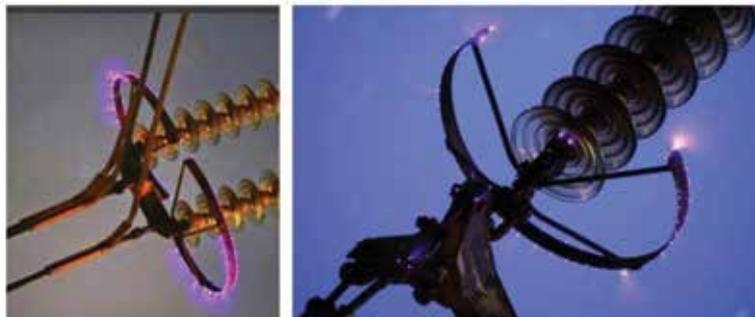


Figura 2: Efeito Corona

fonte: <https://alugagera.com.br/noticias/efeito-corona>

1.1.3 - PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas magnéticas são um tipo específico de perdas técnicas que ocorrem em dispositivos e sistemas que utilizam materiais magnéticos, como transformadores, motores elétricos e indutores. Essas perdas estão associadas à resposta dos materiais magnéticos quando submetidos a campos magnéticos alternados. Podemos destacar as perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas (ou correntes de Foucault) associadas às perdas magnéticas.

As perdas por efeito corona e as perdas magnéticas geralmente são desprezadas na modelagem das linhas de transmissão e distribuição, pois são muito pequenas em relação aos outros parâmetros dessas linhas, além de serem difíceis de calcular.

1.2 - PERDA NÃO TÉCNICA

As perdas não técnicas correspondem à energia elétrica entregue, mas não medida ou faturada, e geralmente depende das condições socioeconômicas de determinado país. As perdas não técnicas são subdivididas em várias componentes, que não são necessariamente as mesmas para todos os operadores de sistemas de potência. Podem ser englobadas dentro das perdas não técnicas a energia elétrica decorrente de furto (ligação clandestina, desvio direto da rede), fraudes (adulterações nos medidores e desvios), erros de processamento de dados medidos e erros de faturamento e medição.

O controle e mitigação das perdas melhoram a eficiência energética, a confiabilidade, a qualidade e segurança no fornecimento de energia elétrica. Além disso, proporciona benefícios econômicos e ambientais para os usuários do sistema. As perdas elétricas também fazem parte do conjunto de critérios que auxiliam na escolha da seleção das alternativas de expansão de sistemas de transmissão e distribuição mais econômicas. As perdas nos sistemas de transmissão são essencialmente técnicas e percentualmente menores do que nos sistemas de distribuição. Isso porque o sistema de transmissão opera em níveis de tensão elevados e com correntes menores em relação ao segmento de distribuição. As perdas na transmissão também são determinadas, essencialmente, através de medições, ao passo que são estimadas e medidas na distribuição. Devido ao elevado número de consumidores, as perdas na distribuição também apresentam elevada componente não técnica. As perdas não técnicas

podem ser reduzidas principalmente através da utilização de medidores inteligentes, que facilitam a detecção de fraudes e apresentam maior precisão nas medidas.

2 - PERDAS E RECUPERAÇÃO DE CUSTOS

As perdas totais de energia em uma rede elétrica podem ser calculadas como a diferença entre a energia injetada e a retirada. No sistema de transmissão, a energia injetada pelos geradores mais a importada de outros países (caso existam linhas de interligação) é subtraída da energia transferida para os transformadores de subtransmissão que vai para as empresas distribuidoras. No sistema de distribuição, a energia injetada, oriunda do sistema de transmissão, mais a energia proveniente dos geradores distribuídos, são subtraídas da energia medida e faturada aos consumidores. A recuperação do custo das perdas é um tema importante na operação das redes elétricas e diferentes formas de aquisição da energia perdida e recuperação do seu custo são encontradas nos diferentes países. Dessa forma, apresenta-se a seguir como é feita a recuperação do custo no Brasil e em países Europeus.

2.1 - CASO BRASILEIRO

A matriz elétrica brasileira é composta predominantemente de fontes renováveis. As fontes solar, eólica e hidráulica compõem, aproximadamente, 67,7% da matriz em 2024 [3]. Deve-se notar, entretanto, que a geração de grande porte se encontra afastada dos centros de consumo, levando a necessidade da transmissão de grandes blocos de potência. Essa grande quantidade de potência é injetada nos sistemas de distribuição através dos transformadores da subtransmissão de energia elétrica.

Na rede de transmissão, onde as perdas são essencialmente técnicas, dados da CCEE de Abril de 2024 indicam perdas medidas na transmissão de 4,45% [4]. Essas perdas são calculadas pela diferença da energia gerada e entregue nas redes de distribuição e são apuradas mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). O seu custo é definido anualmente nos processos tarifários, sendo rateado em 50% para geração e 50% para os consumidores do sistema elétrico [1]. Esse custo é cobrado através da tarifa de uso do sistema de transmissão (TUST),

que é devida aos usuários que usufruem do sistema. Ajustes tarifários e compensações financeiras para as empresas transmissoras são realizados para a recuperação dos custos.

No sistema de distribuição, as perdas técnicas e não técnicas são separadas em valores reais e regulatórios. Os valores regulatórios são estimados através de modelos simplificados da rede elétrica e compreendem os valores que são reconhecidos na tarifa de energia, enquanto os valores reais são os que efetivamente ocorrem. O valor regulatório é cobrado na tarifa de energia dos consumidores, dentro da tarifa de uso dos sistemas de distribuição (TUSD). A diferença de custos entre o valor regulatório e o real é de responsabilidade da concessionária. Os valores regulatórios são normalmente inferiores aos valores reais, pois a agência reguladora (ANEEL) considera critérios de eficiência nos cálculos. Esse mecanismo é uma forma de regulação por incentivos, já que eventuais negligências ou ineficiências das distribuidoras no combate às perdas não são repassados para as tarifas.

Dados de 2020 [1] apontam que a região Norte apresenta o maior percentual de perdas totais (técnica + não técnica) sobre a energia injetada, com 34,2%, e perdas não técnicas reais (23,9%) maiores do que as perdas técnicas reais (10,2%). A região Sul apresenta as menores perdas totais, com 9,4%, e perdas técnicas reais (6,1%) maiores do que as não técnicas reais (3,4%). Considerando o país todo, temos uma média de 14,8% de perdas totais reais no setor de distribuição em relação à energia injetada.

2.2 CASO EUROPEU

Apesar de apresentarem realidades socioeconômicas e sistemas elétricos com características operacionais diferentes, são apresentados na sequência alguns números de perdas nos países europeus, obtidos do estudo apresentado em [2]. É relevante saber também que há diferenças na maneira como as perdas são definidas no continente Europeu. Dessa forma, os componentes das perdas não são necessariamente os mesmos em todos os países.

Na rede de transmissão, as perdas variam entre 0,5% e 3,5% e são majoritariamente técnicas. Dessa forma, na maioria dos países, não são implementados incentivos regulatórios para a redução de perdas na transmissão. Os países que aplicam incentivos usam instrumentos regulatórios variados como a consideração de valores capitalizados de perdas nas decisões de investimento das empresas transmissoras (9 países) e valores alvo para redução de perdas. Neste último caso, os operadores da rede transmissão recebem compensações financeiras caso as metas de redução de perdas sejam atingidas.

As perdas na distribuição, expressas como uma porcentagem da energia injetada no continente Europeu, variam entre 2 e 14%, de acordo com dados de 2018. A maior parte dos países mede e estima as perdas na distribuição, mas não define a perda regulatória, como no Brasil. Em alguns países, como a Finlândia, algumas redes de distribuição operam em alta tensão, levando a perdas reduzidas, apesar do comprimento elevado das linhas de distribuição. Na rede de distribuição, os incentivos regulatórios para redução de perdas são mais presentes nos países europeus. Valores

estimados de perdas são bastante utilizados para estabelecer metas de redução. Na Itália, o operador da rede de distribuição é penalizado ou recompensado a depender do valor das perdas reais em comparação com o valor alvo. Na Dinamarca, os operadores de rede recebem um montante financeiro para compensar os custos das perdas, estimulando as empresas a se tornarem mais eficientes de tal forma a não utilizarem todo o capital disponibilizado.

A recuperação do custo das perdas na Europa varia de acordo com o país. A responsabilidade pelas perdas pode recair sobre os geradores, participantes do mercado, operadores dos sistemas de distribuição e transmissão ou operadores do mercado. Na maioria dos países, os operadores do sistema são responsáveis pela recuperação do custo dentro da sua própria rede e os custos são incluídos na tarifa de transporte de energia elétrica. Em alguns países como Espanha e Portugal, esses custos recaem sobre os geradores e em outros, como Irlanda, Grécia e Bélgica, os usuários da rede são responsáveis pela recuperação do custo das perdas.

3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível concluir, a partir do estudo das perdas totais em redes de sistemas de energia elétrica, que os seus valores representam uma quantia considerável de energia não utilizada. A sua redução deve ser sempre incentivada e mecanismos regulatórios implementados para que os operadores de rede, na transmissão e na distribuição, consigam aumentar a eficiência e a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais. Verifica-se também que os valores de perdas no Brasil e nos países europeus são similares, tanto na transmissão como na distribuição. A Europa apresenta uma diversidade grande de incentivos regulatórios e métodos para cálculo de perdas. A definição de perdas não é a mesma em todos os países e, nas redes de distribuição, nem todos os países incluem as perdas não técnicas nos valores publicados, de forma que uma harmonização na definição de perdas facilitaria a comparação dos resultados obtidos pelas operadoras de rede.

REFERÊNCIAS

- [1] *Aneel, Relatório, Perdas de energia na distribuição. Edição 1/2021*
- [2] *Council of European energy regulators (CEER), 2nd CEER Report on power losses. Ref: C19-EQS-101-03, 23 March 2020.*
- [3] *Site do operador nacional do sistema elétrico brasileiro - ONS. www.ons.org.br*
- [4] *Site da câmara de comercialização de energia elétrica - CCEE. www.ccee.org.br*

* *Haroldo de Faria Junior possui doutorado em Engenharia Elétrica pela COPPE – UFRJ e pós-doutorado pela Universidade de Liège. Atualmente é Professor Associado na Universidade Federal do ABC, no curso de Engenharia de Energia.*

Eduardo Antonio Belati é Professor Associado na Universidade Federal do ABC, onde ministra disciplinas no curso de graduação em Engenharia de Energia e nas pós-graduações em Engenharia Elétrica e Energia.