



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

**PROPOSTA PARA REDUÇÃO DE PERDAS DE
POTÊNCIA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO
DA REDE BÁSICA NACIONAL**

André Luís Gonçalves de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS - CCS

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos
Setores Energético e Mineral

Rio de Janeiro, maio de 2017.



André Luís Gonçalves de Oliveira

**PROPOSTA PARA REDUÇÃO DE PERDAS DE POTÊNCIA NO SISTEMA DE
TRANSMISSÃO DA REDE BÁSICA NACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral, apresentada ao programa de pós-graduação lato sensu em Administração da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral.

Orientador: Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro

Maio de 2017

“Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma. ”

Antoine Lavoisier

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me permitido a concretização dos meus objetivos ao longo da minha vida, não somente nesses últimos meses como estudante de pós-graduação, mas em todos os momentos posso sentir sua presença inspiradora.

A todos os professores por terem me proporcionado o conhecimento necessário ao processo de evolução profissional que agora concluo.

Ao Ministério de Minas e Energia, pela oportunidade de adquirir novos e extraordinários conhecimentos, pela oportunidade de conhecer pessoas incríveis e com histórias incríveis.

Ao meu orientador Rodrigo Flora Calili, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

A minha esposa Andreza, meus pais e aos meus três filhos (Beatriz, Gabriel e Rafael), seu amor é minha força. Nada é mais importante para mim.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

Gonçalves de Oliveira, André Luís. Calili, Rodrigo Flora (Orientador). Proposta para Redução de Perdas de Potência no Sistema de Transmissão da Rede Básica Nacional. Brasília, 2017. 53 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos dias de hoje o conceito eficiência tem ganho uma importância cada vez mais significativa. Surgem assim novas preocupações associadas a este conceito, que até então, tinham sido de certa forma negligenciadas. Em termos práticos, essa nova mentalidade, resulta num combate ao desperdício com efeitos económicos e ambientais. Dessa forma, torna-se essencial a necessidade de avaliar e caracterizar os diversos sistemas de engenharia, com o intuito de maximizar o rendimento e mitigar os custos operacionais e os impactos ambientais decorrentes. Neste o objetivo deste trabalho é identificar os principais mecanismos de perdas no sistema de transmissão bem como apresentar recomendações e sugestões de melhoria com base nos resultados obtidos do Convênio celebrado entre o Ministério de Minas e Energia e o CEPEL.

Palavras- chave

Sistema de transmissão; Perdas; Infraestrutura; Otimização; Temperatura.

Abstract

Gonçalves de Oliveira, André Luís. Calili, Rodrigo Flora (Orientador). Proposta para Redução de Perdas de Potência no Sistema de Transmissão da Rede Básica Nacional. Brasília, 2017. 53 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays the concept of efficiency is getting most significant importance. Associated with this concept, new concerns arise which had been neglected until this moment. In practical level, this new mentality results in combating waste with economic and environmental effects. This way, it becomes essential to evaluate and characterize the various engineering systems in order to maximize efficiency and mitigate operating costs and the resulting environmental impacts. In aim, this work is to identify the main mechanisms of losses in the transmission system as well as to present recommendations and suggestions for improvement based on the results obtained from the Agreement signed between the Ministry of Mines and Energy and CEPEL.

Key-words

Transmission system; Losses; Infrastructure; Optimization; Temperature.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 11 |
| 2 Perdas no Sistema de Transmissão | 13 |
| 2.1. Linha de Transmissão | 13 |
| 2.2. Perdas Técnicas | 14 |
| 2.3. Principais Mecanismos de Perdas em Linhas de Transmissão | 16 |
| 2.3.1. Perdas Efeito Corona | 16 |
| 2.3.2. Perdas Ôhmicas | 17 |
| 2.3.3. Perdas nos Para-raios | 18 |
| 3 Convênio MME - CEPEL | 20 |
| 3.1. Histórico | 20 |
| 3.2. Etapas de Estudo | 21 |
| 3.3. Monitoramento de Linhas de Transmissão (Corrente e Temperatura dos Condutores) | 23 |
| 3.3.1. Sistema Power Donut2 | 26 |
| 3.3.2. Estação Meteorológica | 27 |
| 3.4. Pesquisa Técnico Experimental para Desenvolvimento de Cabos de Elevada Eficiência Térmica | 28 |
| 3.4.1. Procedimento Experimental | 31 |
| 3.4.2. Resultados e Discussões | 35 |
| 3.5. Cálculo de Perdas Magnéticas em Torres de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada | 39 |
| 3.5.1. Perdas Magnéticas em Torres Autoportantes e Estaiadas | 39 |
| 3.5.1.1. Simulação Computacional | 41 |
| 3.5.1.2. Modelagem das Torres | 42 |
| 3.5.1.3. Cálculo das Perdas Magnéticas nas Estruturas | 43 |
| 3.5.1.4 Apresentação dos Resultados | 44 |
| 3.5.1.4.1. Torre Autoportante | 44 |
| 3.5.1.4.2. Torre Estaiada | 45 |
| 3.5.1.4.3. Comparação dos Resultados entre as Estruturas | 46 |
| 3.5.2. Análise dos Resultados Apresentados | 47 |

| | |
|----------------|----|
| 4 Conclusão | 51 |
| 5 Bibliografia | 53 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Sistema Interligado Nacional – SIN | 14 |
| Figura 2: Valores típicos do nível de perdas de cada um dos 5 mecanismos mencionados | 16 |
| Figura 3: Ilustração do Sensor Power Donut numa linha de Transmissão | 24 |
| Figura 4: Instalação do Donut numa torre da LT Blumenau – Palhoça | 25 |
| Figura 5: Instalação da estação meteorológica às ferragens da torre | 25 |
| Figura 6: Detalhamento do Power Donut2 | 26 |
| Figura 7: Cabo revestido para aumentar sua eficiência de resfriamento | 30 |
| Figura 8: Configuração experimental dos cabos ensaiados | 32 |
| Figura 9: Fixação do termopar na superfície externa do cabo | 32 |
| Figura 10: Medição de Temperatura por câmara de termo visão | 33 |
| Figura 11: Energia térmica emitida pelas superfícies dos cabos em função da corrente e emissividade térmica | 36 |
| Figura 12: Variação no tempo das temperaturas nos cabos com e sem revestimento | 37 |
| Figura 13: Comparação de gradientes internos entre o cabo convencional e o cabo com revestimento | 38 |
| Figura 14: Torre Autoportante | 41 |
| Figura 15: Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre autoportante | 43 |
| Figura 16: Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre estaiada | 43 |
| Figura 17: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz) | 44 |
| Figura 18: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura | 45 |
| Figura 19: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz) | 45 |
| Figura 20: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe | |

| | |
|---|----|
| a estrutura | 46 |
| Figura 21: Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e frequência 60 Hz) | 46 |
| Figura 22: Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura | 47 |
| Figura 23: Distribuição espacial da componente longitudinal de campo Magnético na região das estruturas | 48 |

1. INTRODUÇÃO

A regra vigente para as empresas transmissoras implica numa preocupação exclusiva com a disponibilidade das instalações, não remunerando quesitos relacionados com a eficiência e redução de perdas. Desta forma, o tradicional controle de itens de projeto, manutenção e operação de linhas visando o controle das perdas tende a deixar de ser feito por não haver o necessário estímulo econômico à sua execução.

Como o custo das perdas no sistema de transmissão recai sobre os consumidores, o MME decidiu atuar como elemento de controle desse processo, sugerindo ações de redução das perdas evitáveis e eventualmente propondo incentivos e remuneração adicional para as empresas implantarem procedimentos para redução de perdas. Neste trabalho serão apresentados os desenvolvimentos realizados num Projeto conjunto CEPEL/MME, visando quantificar os diferentes mecanismos de perdas de energia e propor técnicas e procedimentos para sua redução.

Neste trabalho são feitas análises dos mecanismos secundários de perda de energia em linhas de transmissão, incluindo as perdas em cabos para-raios, cadeias de isoladores, perdas por efeito corona, etc., e a identificação de procedimentos e técnicas para sua redução.

A perda por efeito joule no sistema de transmissão, por se tratar do mecanismo primário de perdas, teve seu modelo físico geral minuciosamente analisado, incluindo a configuração geométrica da linha e características elétricas dos cabos, influência das condições climáticas (velocidade e direção do vento, radiação solar, chuva) e condição superficial dos cabos (coeficientes de absorção e emissividade). A partir deste modelo físico foi desenvolvida uma metodologia, incorporando previsão das variáveis meteorológicas de interesse, modelos de ampacidade de linhas de transmissão e ferramentas de análise de sistemas, que permitem identificar condições otimizadas de operação do

sistema de transmissão, de modo a trabalhar com a menor perda possível.

No âmbito do convênio entre o MME e o CEPEL foram realizados diversos testes visando identificar a sensibilidade da perda joule em sistemas de transmissão à temperatura de operação dos condutores. Em alguns casos estudados foi possível obter uma redução de perda da ordem de 15% a 20%, o que é um indicativo extremamente promissor do potencial de aplicação de uma metodologia que incorpore a informação climática de cada região na operação do sistema.

No capítulo 2 é feita uma contextualização sobre as perdas técnicas no Sistema Interligado Nacional, onde são citados os principais mecanismos de perdas no sistema de transmissão. No capítulo 3 são apresentados os projetos desenvolvidos e os resultados obtidos do Convênio celebrado entre o MME e o CEPEL.

Ao final do trabalho, serão feitas recomendações de parâmetros e ações a adotar para redução de perdas no sistema de transmissão da Rede Básica Nacional, tomando como base os estudos realizados entre o MME e o CEPEL por meio de Convênio celebrado no ano de 2007.

2. PERDAS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

2.1 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (figura 1) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os

regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor.

Atualmente o Sistema Interligado Nacional é composto por um total de aproximadamente 130.000 km de Linhas de Transmissão, isso se forem consideradas apenas a Rede Básica Nacional, ou seja, Linhas com tensão igual ou superior a 230 kV.

2.2 PERDAS TÉCNICAS

O sistema elétrico de potência é dividido em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As distribuidoras recebem a energia dos agentes supridores (transmissoras, geradores ou outras distribuidoras),

entregando-a aos consumidores finais, sejam eles residenciais, comerciais, rurais, industriais ou pertencente às demais classes.

A energia medida pelas distribuidoras nas unidades consumidoras será sempre inferior à energia recebida dos agentes supridores. Essa diferença é denominada perda de energia.

As perdas no sistema de transmissão são aquelas que ocorrem entre a geração de energia elétrica nas usinas até o limite dos sistemas de distribuição. São apuradas mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, conforme dados de medição de geração e a energia entregue às redes de distribuição. A diferença entre elas resulta no valor de Perdas na Rede Básica e seu custo é rateado em 50% para geração e 50% para o consumo.

Em uma Linha de Transmissão os principais mecanismos de perdas são os seguintes:

- Perda joule nos condutores;
- Perda joule nos para-raios;
- Perda por efeito corona;
- Perda nas cadeias de isoladores;
- Perda nas estruturas de aço.

Segundo as regras vigentes no setor elétrico, as empresas vencedoras dos leilões de transmissão são obrigadas de atender ao edital e às especificações do modelo do setor elétrico no tocante às perdas na transmissão, devendo manter essas perdas dentro dos limites pré-estabelecidos.

Dados obtidos no site do Operador Nacional do Sistema (ONS) citam que as perdas nas Linhas de Transmissão (Rede Básica) no Brasil sejam da ordem de 2 a 4% da energia gerada, ou seja, se forem consideradas a geração de energia elétrica do ano de 2015 que foi da ordem de 615.000 GWh, as perdas na transmissão giraram em torno de 18.000 GWh (uma média de 3% de perdas). A título de comparação, essa energia perdida, somente no sistema de Transmissão, equivale a 2 meses de geração de uma usina do porte de Itaipu.

2.3 PRINCIPAIS MECANISMOS DE PERDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Conforme citado anteriormente, os principais mecanismos de perdas são: perda joule nos condutores, perda joule nos para-raios, perda por efeito corono, perda na cadeia de isoladores e perda nas estruturas de aço. A figura 2 mostra a distribuição e os níveis de perdas em uma Linha de Transmissão de 500 kV:

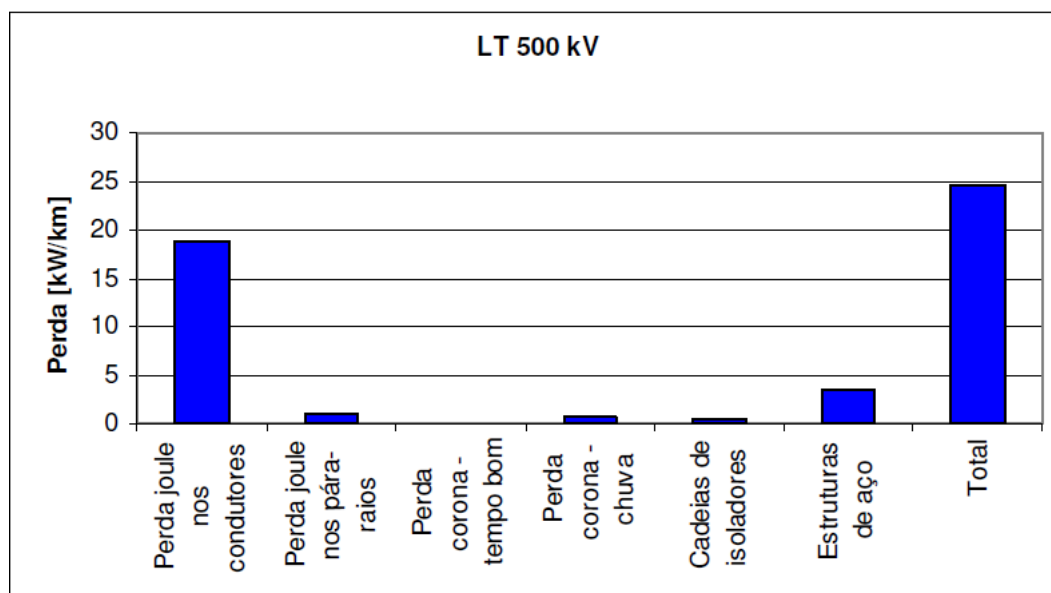


Figura 2: Valores típicos do nível de perdas de cada um dos 5 mecanismos mencionados

2.3.1 PERDAS EFEITO CORONA

O efeito corono é um fenômeno relativamente comum em linhas de transmissão. Devido ao campo elétrico muito intenso nas vizinhanças dos

condutores, as partículas de ar que os envolvem tornam-se ionizadas e, como consequência, emitem luz quando da recombinação dos íons e dos elétrons.

Quanto maior o nível de tensão para uma determinada configuração de linha, maiores serão as perdas devido ao efeito corona. Contrariamente, quanto maior o nível de tensão, menores serão as perdas devido ao efeito Joule (proporcional ao quadrado da corrente), pois, a corrente circulante será menor para uma mesma potência transmitida. Obviamente ter-se-á uma tensão ótima de transmissão considerando, de uma maneira simplificada, os dois tipos de perdas. O nível de tensão definido para a transmissão será, a grosso modo, a tensão normalizada pelos órgãos reguladores mais próxima da tensão ótima.

De um modo geral, as perdas que ocorrem nas linhas estão relacionadas com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais. Constata-se, por exemplo, que as perdas por corona em linhas em tensões muito elevadas podem variar de alguns quilowatts por quilômetro até algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva ou garoa. As perdas médias podem constituir apenas pequenas partes das perdas por efeito joule, porém as perdas máximas podem ter influência significativa nas demandas dos sistemas, pois a capacidade geradora para atender a essa demanda adicional deverá ser prevista.

2.3.2 PERDAS ÔHMICAS

Quando um condutor é aquecido ao ser percorrido por uma corrente elétrica, ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica. Este fenômeno é conhecido como Efeito Joule, em homenagem ao Físico Britânico James Prescott Joule (1818-1889). Uma Linha de

Transmissão de energia elétrica apresenta quatro parâmetros distintos que afetam o transporte de energia:

- Resistência;
- Indutância;
- Condutância;
- Capacitância.

A resistência nos condutores de uma Linha de Transmissão (LT) é a causa mais importante da perda de potência. Pode-se dividir as perdas ôhmicas nos condutores das Linhas de Transmissão em parcela fixa, que depende das características da Linha (Resistência) e em parcela variável (condições climáticas a que está submetida a Linha).

Com relação à parcela variável (temperatura ambiente, por exemplo), existe a possibilidade de otimização dessa perda por meio da consideração em projeto de diferentes temperaturas para diferentes regiões no Brasil. Atualmente as Linhas de Transmissão são calculadas para todo o sistema com a mesma condição ambiental.

2.3.3 PERDAS NOS PARA-RAIOS

O cabo para-raios tem como principal função proteger as fases da Linha de Transmissão de descargas atmosféricas que podem provocar desligamento temporário de uma linha, ou até mesmo danificar cabos e isoladores de forma a desliga-la por um período maior, uma vez que esses surtos atmosféricos são os grandes responsáveis por desligamentos não programados em linhas de transmissão.

Uma função secundária desse tipo de cabo, com o advento dos cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), é a transmissão de informação via fibra óptica. A introdução das fibras ópticas nos sistemas de transmissão

de informação contribuiu de forma decisiva impactando diretamente na redução dos custos envolvidos na comunicação de dados. Dessa forma, os cabos OPGW têm sido bastante utilizados para a proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas.

Como o cabo para-raios é geralmente aterrado nas torres de transmissão, são formados laços e por indução eletromagnética dos cabos fase é gerada uma corrente elétrica que percorre esse laço. Consequentemente, a existência de uma corrente induzida no para-raios gera uma perda ôhmica que até a utilização em massa nas linhas de transmissão do cabo OPGW era considerada desprezível. Com o advento do Cabo OPGW, que possui maior resistência elétrica que os cabos utilizados anteriormente, essas perdas já podem chegar ao patamar de 70 kW/Km.

Nos editais de licitação de Linhas de Transmissão publicados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, as perdas nos para-raios recebem as seguintes considerações:

- a perda total nos cabos para-raios não deverá ser superior ao correspondente a dois cabos contínuos de aço galvanizado EAR de diâmetro 3/8", aterrados em todas as estruturas e na malha de terra das subestações;

- A Perda joule total nos para-raios deverá ser inferior a 10% das perdas nos cabos condutores para qualquer condição de operação.

3. O CONVÊNIO MME – CEPEL

3.1 HISTÓRICO

No período 2005-2006 o CEPEL executou um projeto para o MME denominado “Monitoramento de Perdas no Sistema de Transmissão da Rede Básica Nacional (Convênio nº 029/2004)”, destinado a mapear e monitorar perdas de potência no sistema de transmissão. Nesse projeto foi feita uma avaliação ampla das práticas em uso nas etapas de projeto, construção, operação e manutenção de linhas visando identificar mecanismos de perda e, para cada um desses mecanismos, propor ações para controle dessas perdas. Nas conclusões do projeto foram identificados diversos mecanismos e práticas correntes que, no conjunto compõem um valor expressivo de perda evitável, da ordem de centenas de MW, podendo com um conjunto coordenado de ações de baixo custo ser consideravelmente reduzido. Essas ações implicam os diversos estágios do processo: editais de leilão, critérios de projeto e construção e ferramentas de operação. Os estudos, conclusões e propostas elaborados foram apresentados publicamente, no dia 13 de dezembro de 2006, em evento realizado no CEPEL e coordenado pelo MME.

Nesse mesmo projeto, com base no diagnóstico que identificou que o grau de monitoramento do sistema de transmissão é muito baixo, foi iniciado um plano de monitoramento de linhas de transmissão, tendo sido priorizadas, adquiridos e instalados equipamentos para monitoramento de temperatura do cabo, corrente, voltagem, potência ativa e reativa, inclinação dos cabos, além de variáveis atmosféricas: temperatura do ar, umidade, velocidade e direção do vento, nível de precipitação e radiação solar. Esses equipamentos foram instalados na LT Palhoça-Blumenau, em 230 kV, e a análise dos dados tem permitido importantes observações sobre o desempenho do sistema, além de contribuir para aprimorar modelos de cálculo utilizados no projeto e operação do sistema.

A adoção de medidas concretas para obter a redução de perdas requer a discussão detalhada do diagnóstico realizado e das medidas propostas com os diversos agentes envolvidos (ANEEL, EPE, ONS e empresas), além de uma ampliação das atividades de monitoramento do sistema de transmissão.

Seguindo recomendação desse primeiro projeto, o MME propôs uma nova etapa, com a finalidade de aprofundar e dar sequência aos seguintes itens:

- ampliar as ações de monitoramento do sistema de transmissão;
- atuar, em conjunto com ANEEL, EPE e ONS no sentido de estabelecer ações visando a redução de perdas no sistema de transmissão;

Os estudos, conclusões e recomendações foram apresentados publicamente, no dia 13 de dezembro de 2006, em evento realizado no CEPEL, coordenado pelo MME.

Decidindo pela continuidade destes estudos o MME estabeleceu, com o CEPEL, um novo convênio, designado Perdas II, com a finalidade de dar continuidade aos estudos iniciados no Convenio anterior. O novo Plano de Trabalho, com previsão de duração de 24 meses foi desenvolvido ao longo dos anos 2008 e 2009.

3.2 ETAPAS DE ESTUDO

O novo ciclo de pesquisa foi regido por um novo convênio (Convênio nº 004/2007), e seu Plano de Trabalho definiu as seguintes linhas de atividade, designadas como Projetos:

Projeto I: Monitoramento de Linhas de Transmissão – ampliar as ações de monitoramento do sistema de transmissão. Este Projeto contemplou as seguintes atividades:

- Coleta e análise de dados das Linhas de Transmissão utilizando os equipamentos e softwares adquiridos no convenio anterior.

- Assessoramento as empresas no processo de especificação e compra de novos equipamentos.

- Treinamento de técnicos das empresas para instalação e operação dos equipamentos, e na interpretação e analise dos resultados obtidos.

Projeto II: Propostas de evolução nos procedimentos de projeto e operação de linhas de transmissão. Este Projeto contemplou as seguintes atividades:

- Apoio técnico do MME para análise, juntamente com a ANEEL, de propostas para evolução dos Editais de Licitação de Linhas de Transmissão.

- Apoio ao técnico ao MME para análise, juntamente com o ONS, de propostas para evolução dos procedimentos de operação da rede, visando redução de perdas.

- Apoio ao técnico ao MME para análise, juntamente com a EPE, de propostas para evolução dos estudos de planejamento da expansão da transmissão.

Projeto III: Estruturação de um banco de dados meteorológicos. Este Projeto contemplou as seguintes atividades:

- Elaboração de uma parceria com vários órgãos e institutos brasileiros que atuam na coleta, tratamento e processamento de dados climatológicos.

- Incorporação do uso dos dados já coletados pela rede anemoceraunométrica do CEPEL.

- Estruturação do banco de dados.

Projeto IV: Redução das perdas resistivas e por histerese no aço estrutural de torres de transmissão. Este Projeto contemplou as seguintes atividades:

- Desenvolvimento de modelos para cálculo das perdas no aço de estruturas de transmissão.
- Realização de ensaios no campo visando desenvolver técnicas para projetos de torres de Linha de Transmissão, visando redução das perdas resistivas e por histerese no aço estrutural.

3.3 MONITORAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (CORRENTE E TEMPERATURA DE CONDUTORES)

Para essa fase do projeto de estudos de perdas, identificou-se o interesse e a necessidade de aquisição de equipamentos para monitoração de linhas de transmissão, de modo a aperfeiçoar e validar metodologias e critérios utilizados no projeto e operação, especialmente os modelos térmicos que determinam o carregamento e a temperatura de operação das linhas de transmissão.

O equipamento selecionado para realizar a monitoração das linhas de transmissão, foi o Power Donut2, da Underground Systems Inc. (USi). Este tipo de equipamento, além de proporcionar uma maior segurança operacional, permite por meio da verificação do real regime térmico das Linhas de Transmissão, a realização de estudos e simulações para o aperfeiçoamento das ferramentas computacionais em desenvolvimento, aumentando a confiança nas informações e estimativas que governam a operação das linhas de transmissão. E complementarmente, para os estudos, os parâmetros meteorológicos da região foram monitorados por uma estação meteorológica instalada próxima aos sensores do Power Donut2 (Figura 2).

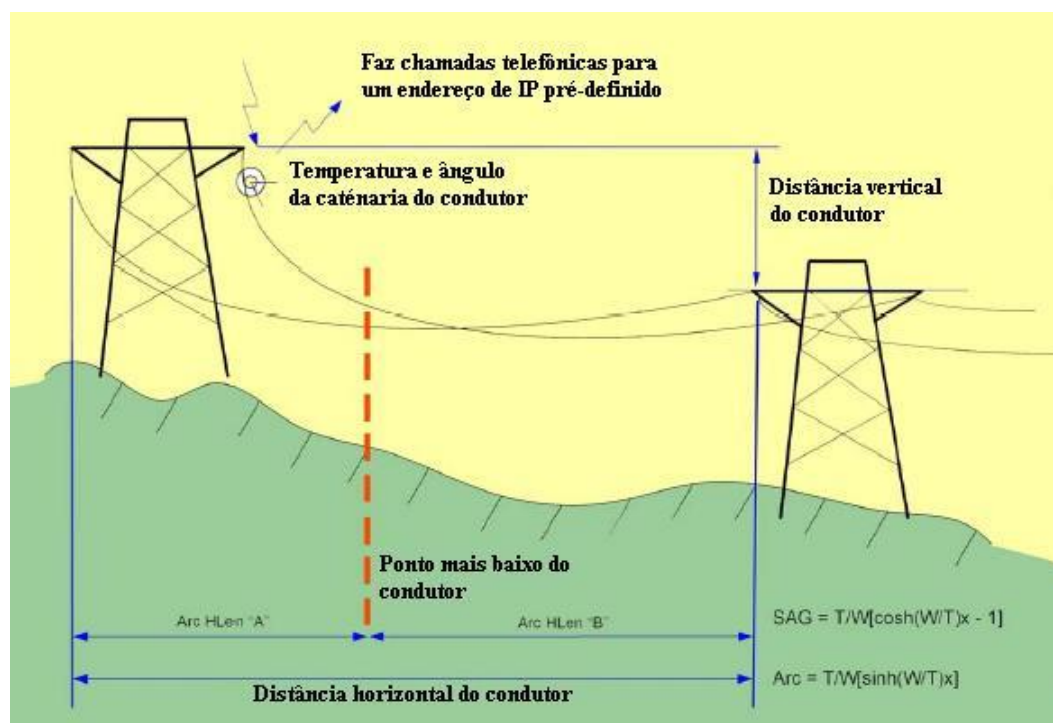


Figura 3: Ilustração do sensor Power Donut2 numa linha de transmissão.

A linha de transmissão monitorada foi a LT Palhoça-Blumenau, 230 KV, da Eletrosul. Os dados medidos e armazenados pelo sistema Power Donut2 e pela estação meteorológica compreendem o período de dezembro de 2006 a abril de 2007, totalizando 5 meses de aquisição de dados.

A estação meteorológica foi instalada nas ferragens da torre de transmissão e o Donut diretamente no condutor.



Figura 4: Instalação do DONUT numa torre da LT Blumenau - Palhoça



Figura 5: Instalação da estação meteorológica às ferragens da torre

3.3.1 SISTEMA POWER DONUT2

O Power Donut2 (figura 6) é um instrumento desenvolvido pela Underground System Inc. (Usi), concebido para a aquisição e armazenamento de dados em sistemas com condutores aéreos em alta tensão.

Instalados diretamente nos condutores da LT, são de rápida instalação e fácil portabilidade. A alimentação do sensor Power Donut2 (Donut) é feita por um circuito interno que utiliza a própria indução eletromagnética do condutor onde está instalado, carregando também uma bateria interna.

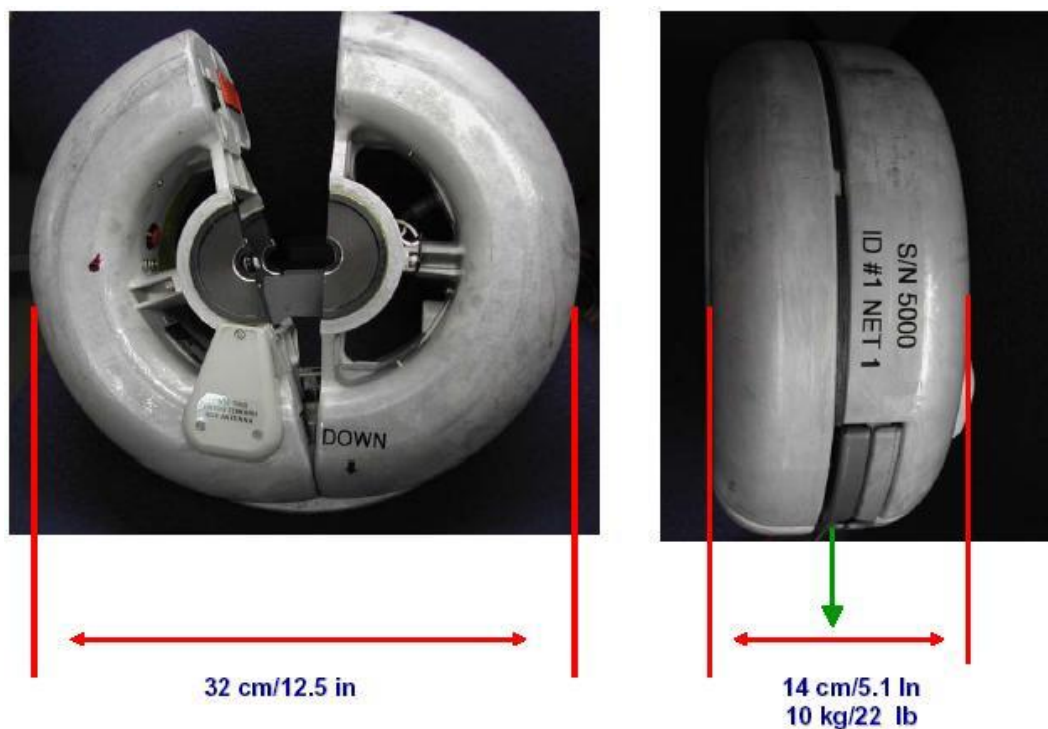


Figura 6: Detalhamento do Power Donut2

O Donut possui uma placa eletrônica com muitas entradas analógicas, capaz de monitorar simultaneamente vários parâmetros, incluindo:

- Corrente;
- Temperatura do condutor;
- Inclinação do condutor (Donut);
- KV;
- MW, MVar, MWh, MVarh;
- etc.

Esses dados são armazenados numa memória FLASH interna do Donut e enviados em intervalos pré-determinados a um servidor que concentra todo o histórico de medições dos Donuts.

3.3.2 ESTAÇÃO METEREOLÓGICA

A estação metereológica é composta por um pequeno e leve transmissor que oferece cinco parâmetros meteorológicos em um único pacote, com a vantagem de ter: medidas precisas e estáveis, nenhuma parte móvel, baixo consumo de energia, baixa manutenção e ser de instalação rápida e simples. O transmissor mediu os seguintes parâmetros:

- Velocidade do Vento;
- Precipitação;
- Pressão Atmosférica;
- Temperatura;
- Humidade Relativa.

3.4 PESQUISA TÉCNICO EXPERIMENTAL PARA DESENVOLVIMENTO DE CABOS DE ELEVAÇÃO EFICIÊNCIA TÉRMICA

Durante alguns ensaios realizados em cabos de linhas de transmissão, com vários tempos de vida útil (diferentes condições superficiais), notou-se uma melhor resposta térmica em cabos com superfície envelhecida, ou seja, cabos com alta emissividade térmica.

Entre as principais vantagens térmicas de cabos com emissividade térmica alta se constatou: a temperatura final de operação atingida pelos cabos é significativamente menor do que para cabos novos; obteve-se uma temperatura mais uniforme ao longo do cabo; os tempos para atingir o regime permanente e para resfriar após uma sobrecarga são menores; os gradientes internos de temperatura permanecem inalterados.

Tais resultados serviram como motivação para projetar cabos de linhas com alta eficiência térmica, aplicando-se para isto um revestimento na superfície externa dos cabos, ou seja, modificando suas propriedades térmicas superficiais, tais como: a emissividade térmica e absortividade térmica.

Assim, os objetivos principais dos experimentos em cabos com revestimento são os seguintes:

- aumentar a capacidade de resfriamento por irradiação térmica, aumentando o valor da emissividade térmica da superfície do cabo, por meio do revestimento;
- diminuir a capacidade de absorção de energia solar do cabo, mantendo-se valores baixos da absortividade térmica com o revestimento aplicado;

- análise das características do revestimento aplicado (canonização, tinta, cor do revestimento, brilho, etc.) e sua influência na capacidade de emissão térmica e absorção solar;
- comparação do desempenho térmico dos cabos revestidos com cabos convencionais, em termos da sua temperatura final de operação.

A capacidade de resfriamento do cabo condutor é determinante para estabelecer o carregamento elétrico a ser imposto a linha de transmissão, pois, quanto maior for o resfriamento do cabo, menor será a sua temperatura e conseqüente poder-se-á aumentar o carregamento elétrico. Dois mecanismos são relevantes para o resfriamento do cabo: a convecção e a radiação térmica. O primeiro depende do vento, sendo, portanto, uma variável aleatória no tempo e no espaço, o que implica na impossibilidade de tê-lo sobre controle. Já a radiação térmica, que depende das características do material e do revestimento, pode, teoricamente, ser controlada e quando necessário é calculada com razoável precisão a partir do conhecimento da emissividade e absortividade térmica de sua superfície.

A radiação térmica é um mecanismo de perda de calor inerente a qualquer superfície. Um corpo acima do zero absoluto irradia calor por meio da sua superfície em forma de ondas eletromagnéticas, na faixa de comprimento de onda dos infravermelhos (aproximadamente de $0,75 \mu\text{m}$ - $15 \mu\text{m}$). A intensidade da irradiação depende da temperatura do material e das características da sua superfície externa. A troca térmica pode ser quantificada em termos da energia irradiada efetiva através da Lei de Stefan-Boltzman; $q_R \approx \epsilon (T_s^4 - T_\infty^4)$, onde ϵ é a emissividade térmica do material, T_s e T_∞ são as temperaturas da superfície do material e do meio ambiente, respectivamente. A emissividade térmica é determinada pela razão entre a radiação emitida pela superfície em questão e pela superfície de um corpo negro, variando entre 0 e 1. Esta propriedade pode ser interpretada como uma medida da eficiência da capacidade de emissão térmica da superfície do corpo. A Lei deixa explícita que quanto

maior for a diferença entre as temperaturas do material e do ar, maior será a importância de uma boa caracterização da emissividade térmica, ϵ .

Para a operação da LT sob condições desfavoráveis, é possível que seja alta a temperatura do cabo, tornando importante que seu processo de resfriamento seja o melhor possível. Como não é possível interferir no vento, a alternativa única é tornar a superfície do cabo mais emissora de energia. Em cabos de alumínio novos a emissividade é da ordem de 0,3 e aumenta gradativamente com o envelhecimento da sua superfície, que sofre todo o processo de poluição, natural ou não, como foi constatado em ensaios feitos nos laboratórios do CEPEL. Esta constatação levou a propor um revestimento na camada superficial do cabo para aumentar sua capacidade de resfriamento por emissão de calor. No revestimento aplicado em um cabo novo (Figura 7), foi possível alterar a emissividade de 0,3 para aproximadamente 0,95. Com isto, obteve-se uma redução significativa na temperatura do cabo.

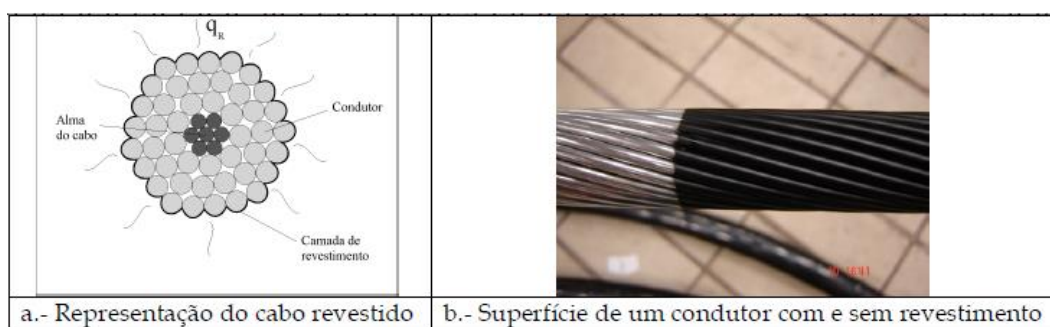


Figura 7: Cabo revestido para aumentar sua eficiência de resfriamento

A radiação solar incidente na superfície de um corpo pode ser absorvida, refletida ou transmitida, sendo esta última aplicável a materiais transparentes ou semitransparentes (como o vidro). Para materiais denominados opacos, como é o caso de metais, uma parcela do raio incidente é refletida e a outra absorvida pela superfície, causando o aumento da temperatura do corpo. No caso de cabos condutores, o cálculo do aquecimento devido a radiação solar não é uma tarefa simples e depende de diversas variáveis, tais como: absorvidade térmica, altura

solo-cabo, ângulo de inclinação do cabo, ângulo do raio incidente, albedo, refletividade do solo, céu claro, presença de nuvens, etc.

3.4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em um laboratório fechado no CEPEL, com temperatura ambiente controlada de 25°C e sem fontes externas de calor e de vento. Para aquecer os cabos foi utilizado um transformador de corrente de forma a induzir no condutor uma corrente de valor controlado, que variou entre 0 e 2000 A. O cabo foi pendurado no ar com cordas isolantes presas no teto, mantendo-se constante a distância do condutor ao piso do laboratório.

O monitoramento da temperatura interna nos cabos ensaiados foi realizado com termopares embutidos. Durante o processo de sua fabricação, foram colocados entre suas camadas 9 termopares tipo J, com precisão de 0,2°C, em três seções transversais do cabo equidistantes ao longo de aproximadamente 11 m. Em cada seção os termopares foram colocados entre a alma e a primeira camada de alumínio, entre a primeira e segunda camadas e entre a segunda e terceira camadas. Foram utilizados termopares com o menor diâmetro disponível no mercado, minimizando os possíveis desarranjos entre os fios das camadas. Este procedimento, aparentemente inovador, de instalar os termopares na fabricação do cabo permitiu realizar medidas mais precisas da temperatura entre as camadas, pois evita danificar o condutor com furos ou afastamento dos fios para a instalação dos termopares, o que pode causar perturbações implícitas das medições experimentais da temperatura.



Figura 8: Configuração experimental dos cabos ensaiados

As medições de temperatura na superfície externa dos cabos foram obtidas com termopares instalados em vários pontos da superfície do cabo. Os termopares na superfície foram firmemente fixados com arame e foi utilizada uma pasta térmica para homogeneizar a região medida (ver figuras 8 e 9).



Figura 9: Fixação do termopar na superfície externa do cabo

Paralelamente às medidas com termopares, foram realizadas medidas de temperatura com uma câmera de termo visão P65 da Flir Systems com detector tipo Matriz Plano Focal (FPA), microbolométrico não refrigerado com resolução 320 x 240 pixels e precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou 2 % de leitura (ver figura 10). Para realizar medições precisas é necessário conhecer alguns parâmetros que são utilizados no ajuste da câmera. Entre estes parâmetros cita-se a emissividade térmica, a temperatura ambiente, umidade relativa, distância do objeto, etc. Com exceção da emissividade térmica, no laboratório os demais parâmetros são bem conhecidos.



Figura 10: Medições de temperatura com câmeras de termo visão.

A emissividade térmica dos cabos foi medida indiretamente, tomando-se como referência a temperatura média dos termopares instalados na superfície do cabo. Simultaneamente com as medidas dos termopares faz-se a leitura da temperatura com a câmera, ajustando-se o valor de entrada referente a emissividade até que as temperaturas se igualem. Para minimizar erros inerentes a medidas experimentais, como por exemplo o mal contato do termopar com a superfície do cabo, no cálculo da temperatura média dos termopares foram considerados apenas

os valores com variação de até 3% da temperatura máxima medida pelos termopares. Nos ensaios foi aplicada uma dada corrente durante 2 horas, o que garante que a temperatura do cabo se estabilizou e o fenômeno está em regime permanente. Após este tempo, monitorou-se simultaneamente com os termopares e com a câmera de termo visão a temperatura na superfície do cabo, nos pontos marcados no piso. A câmera foi cuidadosamente posicionada a uma distância de 50 cm, perpendicularmente a área do cabo a ser medida.

Na primeira fase de ensaios, o revestimento nos cabos foi obtido por meio de tinta, a qual foi cuidadosamente aplicada na superfície da camada externa do condutor. Entretanto, é importante ressaltar que o revestimento pode ser obtido também por meio da canonização dos fios de alumínio, ou, por outra técnica capaz de fornecer uma fina camada de revestimento na superfície externa dos cabos.

Na comparação do comportamento térmico de cabos convencionais e cabos com revestimento, levaram-se em consideração duas características do revestimento que podem afetar suas respostas térmicas. A primeira característica foi considerar a cor do revestimento, afetando tanto a capacidade de emissão de calor (emissividade térmica) como a capacidade de absorção da energia solar, o qual gerara um aumento na temperatura nos cabos. A segunda característica testada foi a condição do revestimento ter brilho ou ser fosco e sua influência na temperatura atingida pelos cabos. Com este fim foram testados quatro revestimentos diferentes:

- Cabo revestido preto fosco;
- Cabo revestido branco fosco;
- Cabo revestido verde floresta brilhante;
- Cabo revestido cinza brilhante.

Cabe ressaltar que a influência da radiação solar no cabo não foi medida experimentalmente devido ao laboratório ser fechado.

3.4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios foram realizados em laboratório fechado em cabos ACSR-Tern. Para os cabos sem revestimentos a emissividade medida experimentalmente foi de aproximadamente 0,3. No caso dos cabos com revestimento as emissividades térmicas variam entre 0.9 e 0.95. O ambiente do laboratório representa as condições atmosféricas de operação de cabos expostos em locais sem influência da radiação solar e sem vento. Como o interesse principal é estudar a emissividade e a absorção em cabos com altas temperaturas, a não incidência de vento é um dos fatores que conduzem a elevadas temperaturas.

A energia térmica emitida pelas superfícies dos cabos com e sem revestimento esta apresentada graficamente na Figura 11, para correntes variando entre 300 A e 900 A. Esta energia foi medida para a temperatura do cabo estabilizada, isto é, em regime permanente. Nota-se na Figura 11 que a energia térmica aumenta com a corrente e a diferença entre as energias irradiadas pelos cabos com e sem revestimentos é praticamente constante para qualquer valor de corrente. Porém a capacidade de resfriamento (maior emissão de energia) é consideravelmente maior nos cabos com revestimento.

Na Figura 11b está apresentada a energia térmica emitida em função da emissividade térmica da superfície dos cabos, para correntes de 500 A, 890 A e 1200 A. A linha tracejada corresponde a emissividade térmica dos cabos novos (~0.3). A medida que a emissividade térmica aumenta, a capacidade de resfriamento dos cabos é maior, pois, a dissipação de energia térmica é mais intensa. Para os 3 valores de correntes considerados na Figura 6, a energia emitida é aproximadamente 3 vezes maior nos cabos com revestimento quando comparadas com cabos novos.

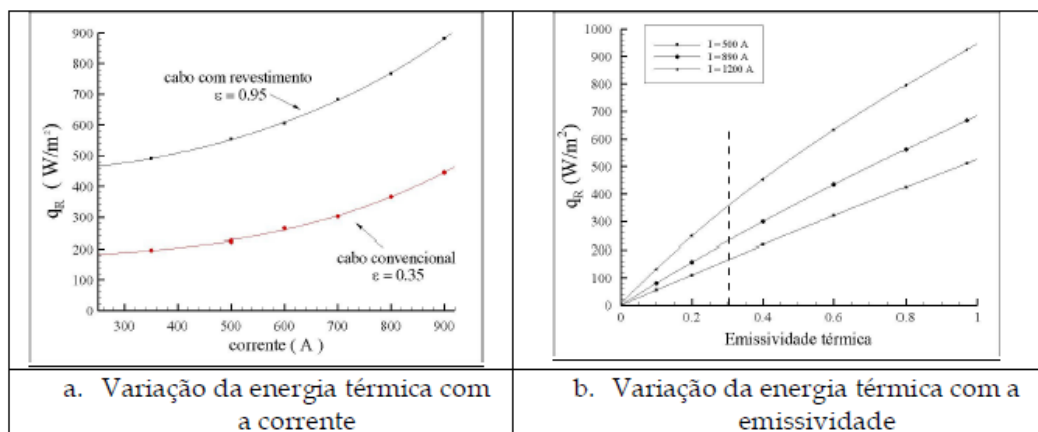


Figura 11: Energia térmica emitida pelas superfícies dos cabos em função da corrente e emissividade térmica.

Um dos efeitos mais importantes advindos do aumento da emissão de energia térmica é o resfriamento do cabo, e, conseqüentemente na diminuição da sua temperatura, o que está representado graficamente na Figura 12, para cabos com e sem revestimentos submetidos a correntes de 500 A, 700 A e 900 A. A comparação entre as temperaturas dos cabos leva a concluir que os cabos revestidos têm temperaturas bem menores que as do cabo sem revestimento. Percentualmente obteve-se uma redução de aproximadamente 16%, 22% e 30% para as correntes de 500 A, 700 A e 900 A, respectivamente como mostrado na Figura 12.

Os ensaios demonstraram que a cor e a característica de fosco ou brilhoso do revestimento não tem um efeito significativo no valor da sua emissividade térmica. Em outras palavras, para baixas temperaturas a diferença entre as temperaturas dos cabos revestidos e desprezível chegando a 4°C para as temperaturas mais altas. Verifica-se, ainda, que o tempo para que a temperatura se estabilize é menor nos cabos com revestimentos. O mesmo ocorre para o decaimento da temperatura com o desligamento da fonte. Estas duas constatações permitem especular que para uma variação brusca de corrente ou de condições climáticas a resposta da temperatura dos cabos se dá de forma mais rápida, o que é interessante em situações de ocorrência de curto circuito, pois o cabo atingirá uma menor temperatura além de ser mais rápido o decaimento para a temperatura de regime permanente.

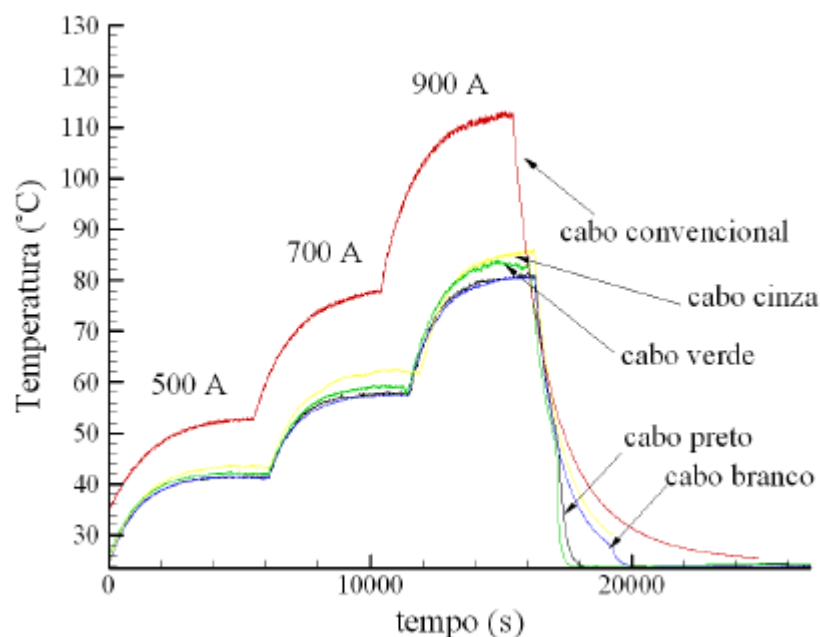


Figura 12: Variação no tempo das temperaturas em cabos com e sem revestimento.

Conforme mencionado anteriormente, nos ensaios foram medidas as temperaturas nas camadas internas dos cabos. Em cabos com revestimento, o aumento da emissão de energia térmica na superfície pode resultar em um resfriamento maior na superfície que no interior do cabo. Contudo, nos dados obtidos nos ensaios não se observaram mudanças significativas dos gradientes radiais de temperatura das camadas internas, entres os cabos com e sem revestimentos, como mostrado na Figura 13. Nesta figura é mostrada as curvas de temperatura quando aplicadas três correntes diferentes. A curva em vermelho denota a temperatura entre a alma e a camada mais interna do condutor e a curva azul denota a temperatura na superfície externa do cabo.

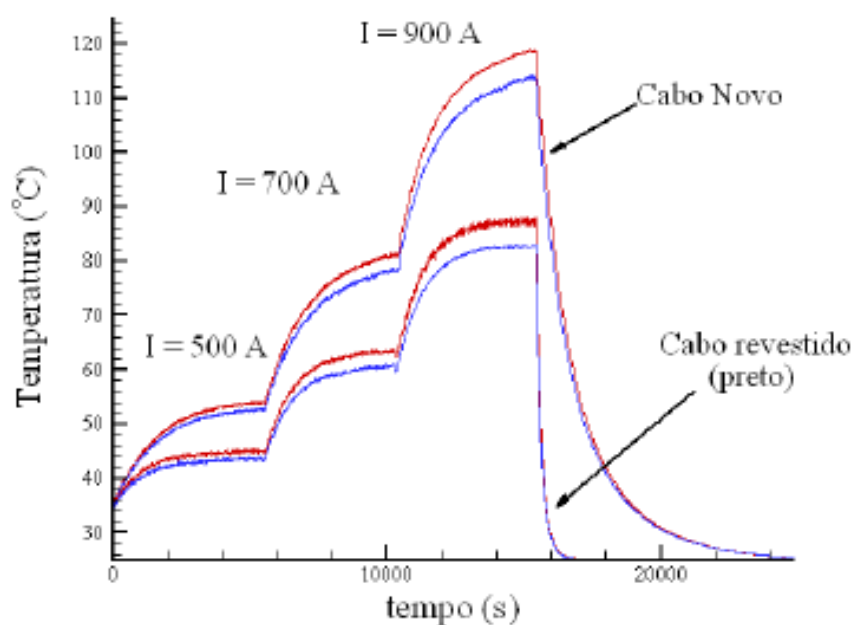


Figura 13: Comparação de gradientes internos entre o cabo convencional e o cabo com revestimento.

As vantagens obtidas com o revestimento, também, podem ser estendidas para os cabos termo resistentes, que são aplicados para a operação de LT com altas temperaturas. Chama-se a atenção de que os maiores ganhos dos revestimentos estão associados as altas temperaturas, que é esperado em cabos termo resistentes. Com a diminuição da temperatura dos cabos termorresistentes têm-se uma redução nas perdas elétricas, pois a resistência elétrica do cabo estará a uma menor temperatura.

Outro possível uso dos resultados dos ensaios está relacionado ao diâmetro do condutor, pois como a resistência elétrica será menor (referenciada a uma temperatura mais baixa) pode ser possível o uso de um cabo com menor resistência, ou seja, menor área de alumínio.

3.5 CÁLCULO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA

No Brasil, as torres de transmissão de energia, que compõem parte do sistema elétrico de transmissão, são constituídas quase exclusivamente de materiais metálicos – cantoneiras de aço galvanizado, cabos estruturais e estais. A interação destes materiais com o campo magnético gerado pelas correntes que circulam nos cabos condutores da linha de transmissão forma, nos mesmos, circuitos magnéticos, suscetíveis a ocorrência de perdas por histerese, e circuitos elétricos, suscetíveis a ocorrência de perdas ôhmicas pela circulação de correntes de Foucault.

No panorama atual sobre o estudo de perdas no sistema de transmissão, merece destaque o estudo das perdas nas estruturas de aço que compõem as torres de transmissão de energia. Esse destaque está ligado a carência de um modelo que apresente parâmetros eletromagnéticos mais precisos, que caracterizem os perfis de aço estrutural sob o ponto de vista eletromagnético.

3.5.1 PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES AUTOPORTANTES E ESTAIADAS

Serão analisadas a seguir as perdas magnéticas em dois tipos de torres de transmissão, autoportante¹ e estaiada².

Uma vez dispostas às mesmas regiões de campo magnético, as perdas magnéticas nestas torres dependem, exclusivamente, apenas de

¹ São torres feitas de estruturas metálicas galvanizadas a fogo, compostas por uma parte reta superior e uma parte piramidal na base. São formadas por módulos treliçados e exigem pouca área para sua instalação.

² São torres mais econômicas e fáceis de instalar em comparação com as torres autoportantes. São constituídas por um corpo metálico modulado, fixo por cordoalhas de aço (estais) fixadas o longo da torre e às fundações. Exigem grande área para sua instalação em comparação com as torres autoportantes.

suas geometrias estruturais, desde que sejam construídas com materiais de mesmas características eletromagnéticas.

Em uma torre de transmissão de energia, devido à complexidade da disposição do conjunto de cantoneiras que constitui sua estrutura, o cálculo tridimensional do campo magnético em seus perfis metálicos requer uma ferramenta computacional dotada de uma metodologia robusta de cálculo. Na busca por uma simulação que se aproximasse de uma situação real, foi utilizado pelo CEPEL como ferramenta computacional o programa FDETP (*Frequency Domain Electromagnetic Transients Program*), que permitiu a modelagem tridimensional das torres e o cálculo da intensidade de campo magnético na estrutura das mesmas.

Nesse estudo, de antemão, são feitas duas suposições:

- que a estrutura das torres estudadas fosse integrada pelo mesmo tipo de material que compõe o conjunto de cantoneiras;
- material submetido a um campo magnético gerado por um sistema suposto trifásico, senoidal, balanceado e com frequência de 60 Hz.

A configuração eletro-estrutural da torre autoportante (foto 6), utilizada para se estimar as perdas magnéticas, se baseou nas torres que compõem o sistema de transmissão de 525 kV que interliga a usina de Itaipu a SE de Foz do Iguaçu, conforme apresentadas na figura 14 abaixo. Este sistema, composto por 4 linhas de transmissão, possui em média 8 km de extensão, totalizando 79 torres.



Figura 14: Torre autoportante

A modelagem tridimensional da torre estaiada, feita de forma estilizada, se baseou no dimensionamento típico de uma torre real com nível de tensão de 500 kV. A configuração e a disposição dos feixes, utilizados como um dos parâmetros para se determinar a distribuição de campo magnético nos perfis de aço, foi a mesma descrita para a estrutura autoportante.

3.5.1.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A base da simulação computacional foi realizada por intermédio do programa FDETP, elaborado no departamento de Linhas e Estações da Eletrobrás CEPEL. A metodologia empregada no programa FDETP é fundamentada no domínio da frequência e permite analisar “circuitos elétricos”, bidimensionais e tridimensionais, constituídos por vários elementos lineares e não lineares.

A simulação, com o objetivo de determinar a distribuição espacial do campo magnético nos perfis de aço das estruturas, se deu em duas etapas: na modelagem tridimensional das torres e dos elementos necessários ao cálculo tridimensional do campo magnético.

3.5.1.2 MODELAGEM DAS TORRES

Nesse estudo, os perfis estruturais foram representados por um grupo de centenas de treliças, conforme padrão existente no programa FDETP, sendo cada treliça simulada por eletrodos cilíndricos tridimensionais de aço, com o raio de 5 cm. Para cada estrutura, foram feitas 3 modelagens, de acordo com o nível de discretização da quantidade de treliças. As figuras 15 e 16 abaixo apresentam a vista frontal dos modelos obtidos para 3 níveis de discretização. Quanto maior o nível de discretização, melhor é a representação do modelo, de forma a se aproximar de uma estrutura real. No nível 0, a torre é representada apenas pelos seus membros principais. Nos níveis 1 e 2, a torre é representada por treliças intermediárias, porém com ordens de divisão distintas.

Para a modelagem tridimensional da torre estaiada, os estais, que fixam os mastros ao solo, também foram considerados.

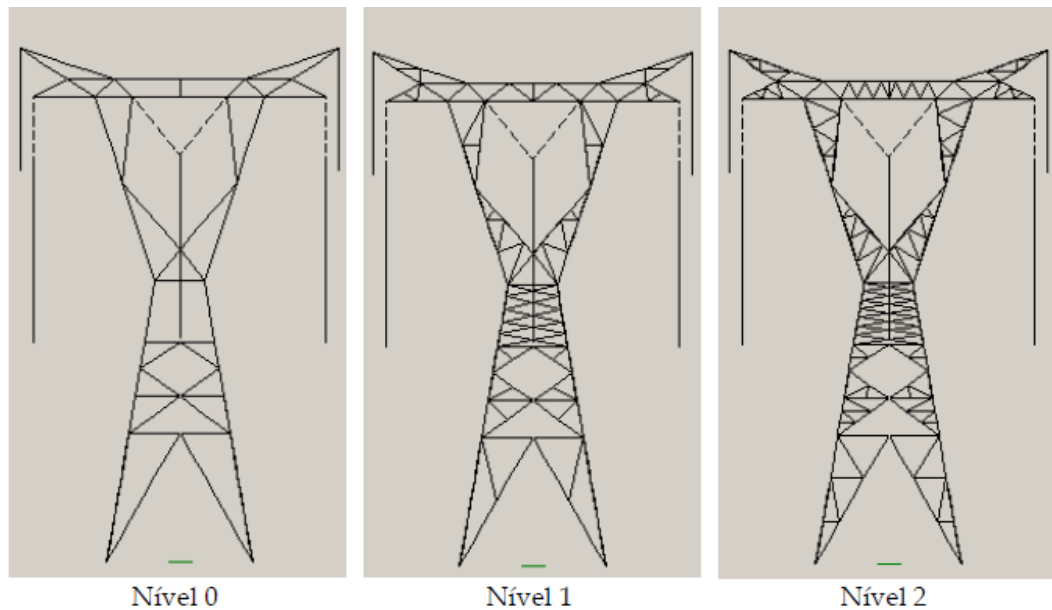


Figura 15: Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre autoportante.

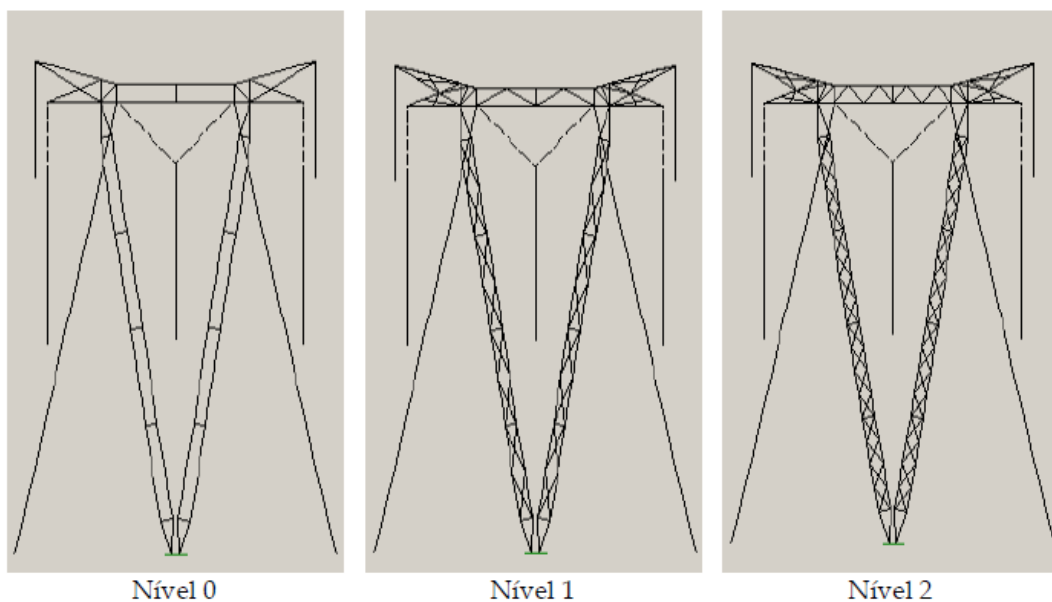


Figura 16: Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre estaiada.

3.5.1.3 CÁLCULO DAS PERDAS MAGNÉTICAS NAS ESTRUTURAS

Após a modelagem dos elementos, executou-se a análise computacional dos casos e a extração dos dados pertinentes ao cálculo das perdas magnéticas nas estruturas, isto é, dos pontos espaciais das extremidades de cada eletrodo e do valor da componente longitudinal de campo magnético para cada eletrodo.

Para a realização dos cálculos das perdas, foram criadas rotinas computacionais visando estabelecer o comportamento das perdas nas estruturas de acordo com o carregamento da linha.

3.5.1.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados é constituída em três blocos: torre autoportante; torre estaiada e na comparação dos resultados entre as duas estruturas.

3.5.1.4.1 TORRE AUTOPORTANTE

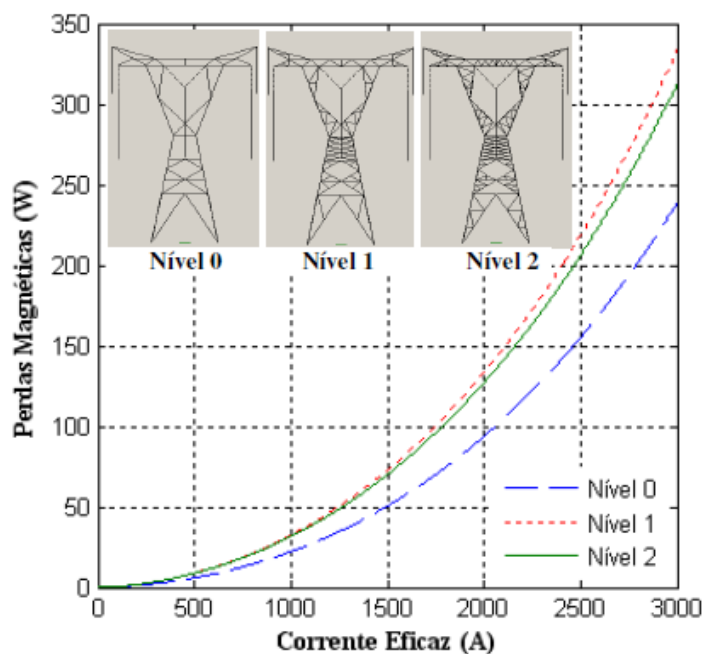


Figura 17: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

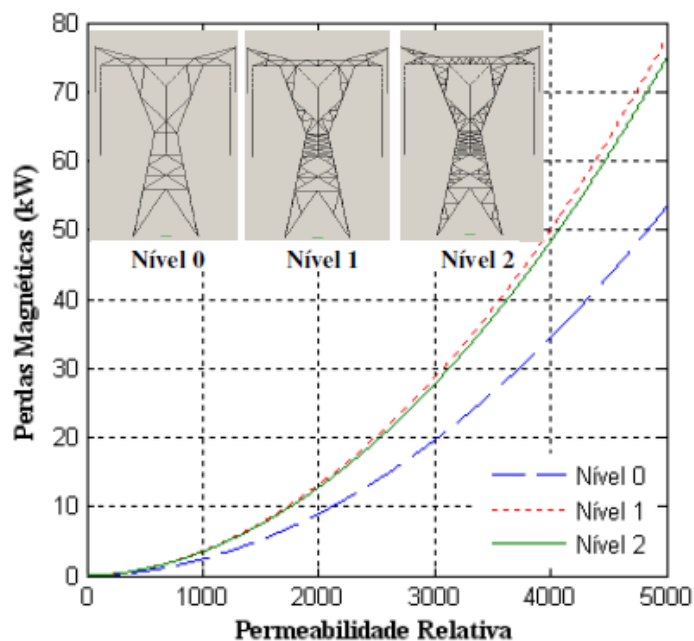


Figura 18: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

3.5.1.4.2 TORRE ESTAIADA

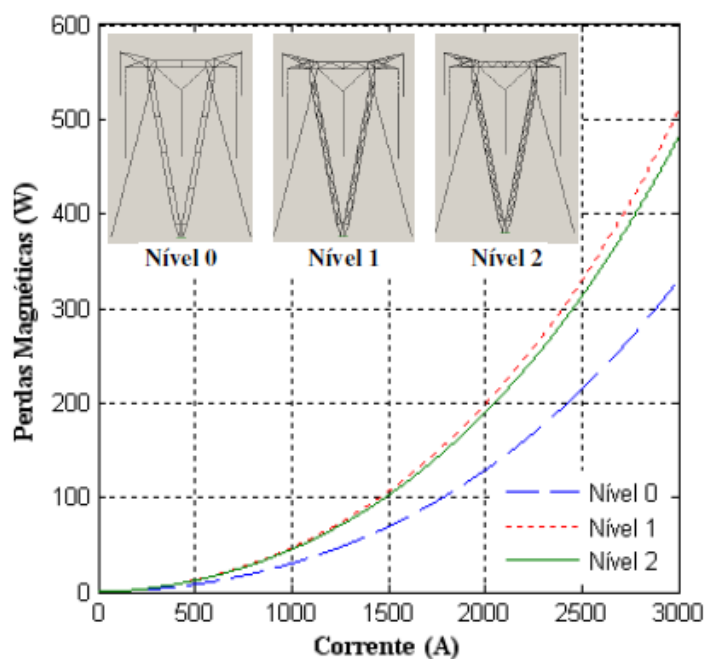


Figura 19: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

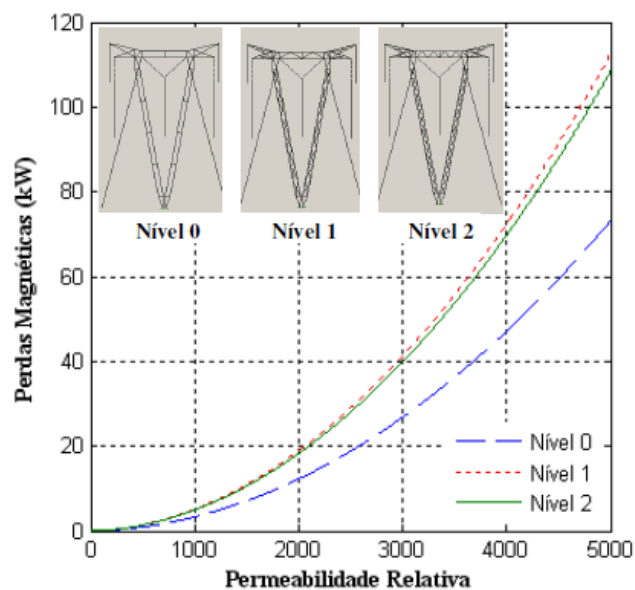


Figura 20: Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

3.5.1.4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE AS ESTRUTURAS

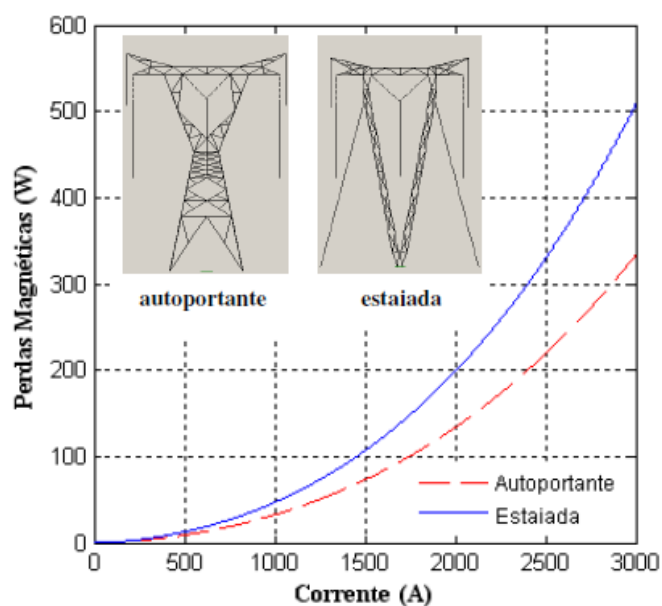


Figura 21: Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e frequência 60 Hz).

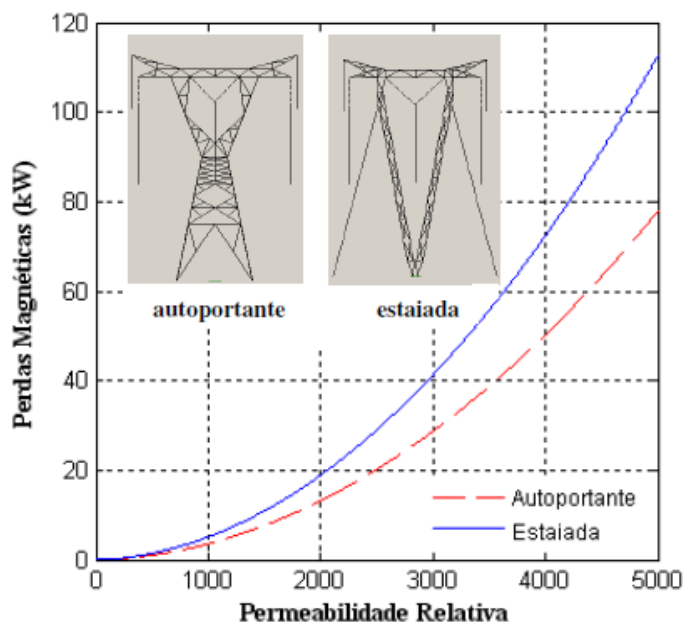


Figura 22: Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

3.5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS APRESENTADOS

Como apresentado pelos resultados obtidos, conforme mostra as figuras 17 a 22, o comportamento das perdas magnéticas, a princípio, se mostra mais suscetível a variação da permeabilidade relativa do material do que a variação de corrente nas fases da linha. No entanto, a variação das perdas apresenta a mesma sensibilidade a variação destas grandezas, pois a indução magnética no material é diretamente proporcional às mesmas. Contudo, em uma situação real, onde não há uma padronização do material que compõe as torres de transmissão, a permeabilidade relativa pode ter uma gama mais variada que o carregamento da linha, o que torna a permeabilidade relativa um parâmetro de fundamental influência para as perdas numa estrutura.

Com relação aos níveis de discretização para o modelo das torres, observou-se nos resultados, para ambas as estruturas, que o comportamento das perdas registrado no nível 2 foi ligeiramente inferior ao obtido no nível 1.

No contexto dos resultados comparativos entre as duas estruturas para o nível 1 de discretização, nota-se que os valores encontrados para perdas na estrutura estaiada são superiores aos apresentados na estrutura autoportante. Sem dúvida alguma, pelo fato da torre autoportante ser mais robusta e aparentemente com maior volume de material comparado a estaiada, este comportamento não era esperado. Contudo, pelos resultados terem sido obtidos por meio de simulação, o que não retrata a realidade com 100 % de exatidão, esta análise deve-se restringir aos dados obtidos pelas simulações, não cabendo tirar conclusões de fatos reais em cima de dados simulados.

Buscando uma interpretação mais consistente para estes resultados, supôs-se que este efeito fosse causa da distribuição espacial da intensidade de campo magnético, onde se admitiu a hipótese de o campo magnético ser mais intenso na região contida pelo material da estrutura estaiada. Para verificar a consistência desta hipótese foram feitas simulações com o objetivo de possibilitar a visualização da distribuição espacial de campo magnético nas estruturas, como apresentado nas figuras a seguir. Os resultados apresentam uma vista frontal do modelo tridimensional das estruturas (Figura 23).

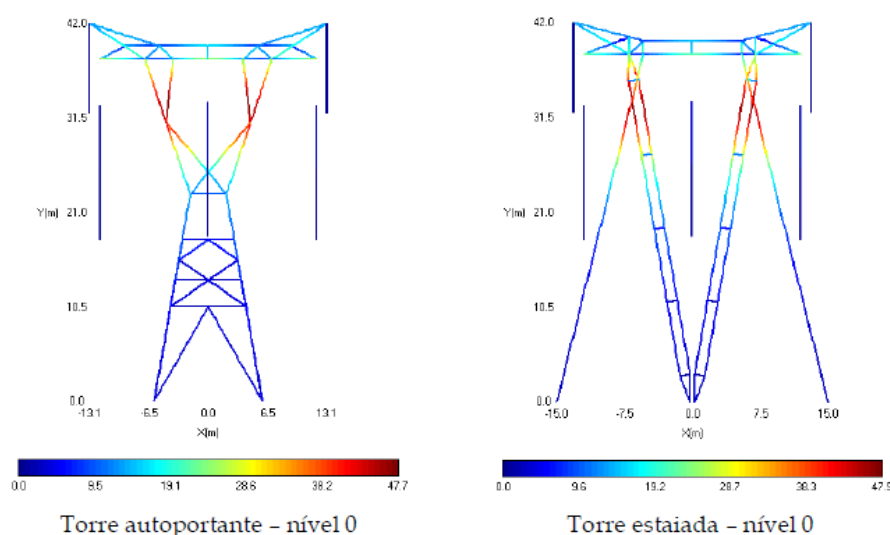


Figura 23: Distribuição espacial da componente longitudinal de campo magnético na região das estruturas.

De fato, o que pode se concluir sobre o comportamento observado é a suposição de que no modelo da torre estaiada, uma maior quantidade de eletrodos está sujeita a níveis de campo magnético mais intenso, afinal as perdas obtidas foram superiores às registradas pela estrutura autoportante.

Conclui-se também que a porção das torres que mais contribui para as perdas magnéticas é a superior, situada nas proximidades dos cabos de fase. No caso da torre autoportante, a “cabeça da torre”.

A análise dos resultados apresentados se concentra agora na importância que estes possuem dentro do cenário das perdas de potência em um sistema de transmissão, mais precisamente sob o aspecto econômico.

O projeto de uma linha de transmissão envolve uma sequência de atividades, onde as interdependências dos parâmetros elétricos, mecânicos e ambientais que interferem no dimensionamento são estudados de modo a se obter o especificado desempenho operacional do empreendimento aliado aos menores custos possíveis.

Na transmissão em corrente alternada, considera-se como custo total da LT o somatório dos custos referentes às perdas elétricas, instalação, compensação de reativos, manutenção e operação. Os custos das perdas elétricas são devidos às perdas de potência e energia nos cabos condutores por efeitos Joule e corona. Neste aspecto, as perdas magnéticas nas estruturas nunca tiveram um estudo mais detalhado.

Considerando 25 anos de vida econômica da linha, uma taxa financeira de atualização anual equivalente a 8% a.a. e um custo das perdas de energia sendo de 113 R\$/ MW, esta linha, fornecendo 1544 MW, apresenta um custo com as perdas Joule e corona da mesma ordem de grandeza do custo de instalação da linha. Sendo assim, a título de

exemplo, um acréscimo de 10 % nos custos com as perdas do sistema, acarretaria 5% no custo de empreendimento da linha.

Com base nos dados obtidos, as perdas nas estruturas são da ordem de 0,5% com relação as perdas Joule e corona. Consequentemente, “para esta situação”, o impacto que as perdas nas estruturas provocam para o custo total de um empreendimento são muito pequenos, não sendo viável a tomada de medidas preventivas e de controle para minimizar este fenômeno.

4. CONCLUSÃO

As conclusões apresentadas pelo CEPEL e que decorrem da implementação dos 4 (quatro) Projetos que integraram o Plano de Trabalho do Convênio celebrado com o Ministério de Minas e Energia, resultaram dos estudos realizados ao longo da vigência do Convênio, cuja síntese é apresentada a seguir:

- houve modificações nos Editais de Licitação de Linhas de Transmissão — perdas nos cabos para-raios e critérios de transposição. Além disso, verificou-se, em vários fóruns e congressos técnicos, o crescimento do espaço de discussões técnicas relativas à redução de perdas;

- o monitoramento realizado na Linha Blumenau - Palhoça foi bem-sucedido e os dados coletados representaram uma importante base técnica para validação e aprimoramento dos modelos de cálculo, o que terá repercussão nos critérios e métodos de projeto e operação de linhas de transmissão;

- criou-se um banco de dados meteorológicos por meio da cooperação técnica estabelecida com os institutos INPE, INMET e SIMEPAR. Foram agregados dados e desenvolvidos algoritmos de análise que reforçaram e ampliaram a base anteriormente existente. A importância deste acervo tecnológico tem-se manifestado no apoio intenso e continuado proporcionado pelo CEPEL à EPE e empresas transmissoras, sobretudo no desenvolvimento de novos projetos de transmissão. Tal acervo tecnológico encontra-se disponível no CEPEL para consulta;

- foi desenvolvido um sistema computacional para representação e análise de topologias complexas redes de transmissão - na qual poderão ser agregadas as informações resultantes do monitoramento de Linhas

para processamento e identificação de alternativas de redução global de perdas na transmissão;

- foi possível quantificar e validar os mecanismos de perda em estruturas de aço. Verificou-se que essa perda está efetivamente presente no processo de transmissão de energia. Porém, esta pode ser mantida em níveis reduzidos desde que o aço das estruturas tenha permeabilidade magnética relativa baixa;

- foi desenvolvido um ciclo de pesquisa teórico-experimental que demonstrou a viabilidade técnica do desenvolvimento de cabos de elevada eficiência térmica, que, nas mesmas condições de um cabo convencional, operam em temperatura significativamente inferior, em decorrência de propriedades superficiais que aumentam a capacidade de resfriamento do condutor. Essa linha de desenvolvimento é altamente promissora uma vez que esta tecnologia tem o potencial de aumentar significativamente a capacidade de transmissão de uma Linha.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Relatório Final do Convênio 029/2004, celebrado entre o Ministério de Minas e Energia - MME e o Centro de Pesquisas Elétricas – CEPEL (denominado PERDAS I).
- [2] Relatório Final do Convênio 004/2007, celebrado entre o Ministério de Minas e Energia - MME e o Centro de Pesquisas Elétricas – CEPEL (denominado PERDAS II).
- [3] MME - Ministério de Minas e Energia. Informações diversas e links para vários sites. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 15/02/2017.
- [4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Informações diversas e links para vários sites. <http://www.aneel.gov.br/> . Acesso em 17/02/2017.
- [5] CEPEL - Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Informações diversas e links para vários sites. <http://www.cepel.gov.br/> . Acesso em 05/02/2017.
- [6] SENS, M. A., 2010, *Propriedades Elétricas e Magnéticas de cantoneiras de Aço Galvanizado para Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, relatório n. 36458, Eletrobras Cepel, Rio de Janeiro.*
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5161: Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – Verificação das Propriedades. Rio de Janeiro, Julho 1977, 35 p.*
- [8] PINTO, R.L.F., DOMINGUES, L.A.M.C., BARBOSA, C.R.N., *Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Calculo de Campos Elétricos, Magnéticos e Induções – Programa CAMPEM, Depto. Linhas e Estacoes, Eletrobrás Cepel, Rio de Janeiro, 2005.*