



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT - 23
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM A UTILIZAÇÃO
DE TECNOLOGIA DE MAPEAMENTO DIGITAL A LASER**

Ana Paula Baungarten Kersting*

LACTEC

Mauricio Müller

LACTEC

João Nelson Hoffmann

COPEL TRANSMISSÃO

RESUMO

Neste IT é apresentada a tecnologia de mapeamento topográfico digital a laser (LIDAR), sendo discutidas as particularidades de sua implementação para levantamentos planialtimétricos de linhas de transmissão de energia elétrica. Em complemento, são mostradas aplicações de ferramentas computacionais de projetos (*software* PLS-CADD) utilizando os dados provenientes do mapeamento digital, visando principalmente a otimização de projetos de recapacitação de linhas aéreas de transmissão. Conclui-se que o LIDAR é uma ferramenta precisa, moderna e de grande versatilidade, plenamente aplicável na recapacitação de linhas existentes, assim como no estudo de traçado e no projeto executivo de linhas novas.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Recapacitação, Mapeamento Digital a Laser, Levantamento Planialtimétrico

1.0 - INTRODUÇÃO

Ao longo de diversas décadas o levantamento planialtimétrico necessário à construção e/ou recapacitação de linhas de transmissão tem sido feito por meio de medições de campo ao longo do traçado, onde são levantados em média 1 ponto a cada 10 metros sobre o eixo e os perfis laterais. De posse dessas informações, com a utilização de gabaritos ou programas digitais de cálculo de linhas de transmissão, são feitos os estudos de locação das estruturas da linha de transmissão. Esse processo tradicional, por envolver trabalho de campo, além do inconveniente de requerer a presença física freqüente de topógrafos em propriedades de terceiros, acaba tornando-se demorado e caro.

O sistema de mapeamento digital a laser, internacionalmente conhecido como LIDAR, constitui-se numa alternativa ao levantamento de campo. Esta tecnologia foi pioneiramente utilizada em linhas de transmissão no Brasil pelo LACTEC (1),(2), e será apresentada em detalhes neste Informe Técnico, incluindo aplicações práticas realizadas em conjunto com a COPEL.

2.0 - TECNOLOGIA DE MAPEAMENTO DIGITAL A LASER

A tecnologia de mapeamento digital a laser é um sistema de sensoriamento remoto ativo, aerotransportado, que utiliza a técnica de varredura com pulsos de laser, para produção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) densos e precisos. Os componentes básicos desse sistema (ver Figura 1)

*Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Caixa Postal 1309
CEP 80011-970 - Curitiba - PR - BRASIL
Tel.: (041) 361-6223 - e-mail: anapaula@lactec.org.br

são: uma unidade de medição laser, um sistema de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*), e uma unidade de medição inercial (IMU – *Inercial Measurement Unit*). Um receptor GPS é instalado na aeronave e registra sua posição em intervalos fixos. Receptores GPS instalados em pontos de coordenadas conhecidas em campo (estações terrestres), provêm a correção de diferencial para uma determinação de posição mais precisa.

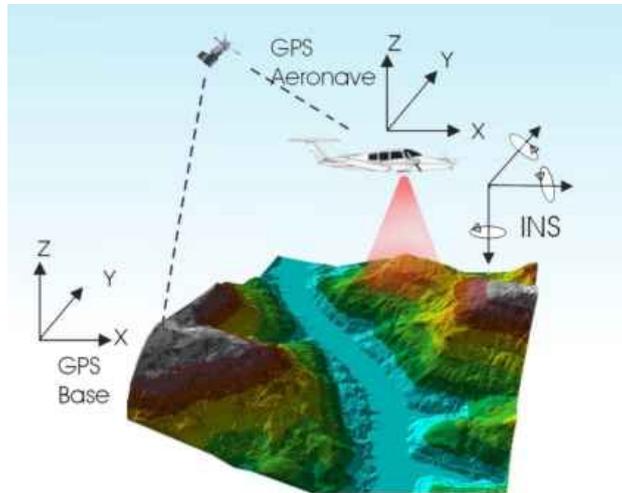


FIGURA 1 – Componentes do Sistema

O princípio de funcionamento está baseado na emissão de feixes de laser infravermelho em direção à superfície terrestre, onde são refletidos por obstáculos ou pelo próprio terreno, e são captados pelo sensor. O sistema mede com precisão o tempo de retorno do pulso, desde sua saída até o seu retorno. Como a movimentação do pulso dá-se na velocidade da luz, o receptor capta o retorno do pulso antes do próximo pulso ser emitido. Sendo conhecida a velocidade da luz, o tempo de percurso do pulso pode ser convertido em distância. As taxas de emissão de laser podem variar de poucos até dezenas de milhares de pulsos por segundo. Assim sendo, grandes volumes de dados podem ser coletados.

Existem diversos mecanismos de varredura empregados em equipamentos de laser, dentre os quais estão os *polígonos de rotação*, *varredura Palmer* e *espelhos oscilantes* (3). Esses diferentes mecanismos possuem diferentes padrões de escaneamento. Os espelhos oscilantes, que abrangem a grande maioria dos equipamentos de laser aerotransportados existentes, produzem um padrão de linha em zigue-zague. O espelho serve como defletor do feixe de laser e sua direção muda de acordo com a taxa especificada pelo operador. Com este sistema obtêm-se linhas quase perpendiculares à direção de voo. A largura das faixas produzidas varia em função da altitude de voo e do ângulo de abertura da varredura. Para um voo realizado a uma altura de 2000 metros e com ângulo de abertura total de 40°, obtém-se uma faixa de 1,5 km. Para grandes áreas, são necessárias várias linhas de voo com uma sobreposição lateral planejada para permitir uma cobertura contínua (1).

Quando o feixe de laser é emitido é possível que uma porção do laser encontre um ou mais objetos antes de atingir o solo. Esses encontros geram retornos parciais do feixe, sendo que o sistema armazena dados do primeiro e do último pulso retornado pelo mesmo feixe. De posse desses dois tipos de informação, é possível gerar modelos digitais a partir do primeiro pulso, do último e de ambos. Essa característica tem sua importância reforçada quando a altura de árvores ou edificações é uma informação de interesse.

3.0 - APLICAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A utilização da tecnologia de mapeamento digital no levantamento de linhas de transmissão permite determinar com precisão e rapidez a elevação do terreno na faixa de domínio, a posição das estruturas da linha, dos cabos fase e cabos pára-raios bem como as condições em termos de obstáculos existentes nas proximidades. Além disso, a grande quantidade de pontos obtidos permite determinar a posição dos cabos e dos obstáculos com intervalos de poucos centímetros ao longo de toda a linha.

Os resultados das distâncias cabo-solo e cabo-obstáculo obtidos com as informações do LIDAR, aliados às informações das condições ambientais da região da linha (temperatura, direção e velocidade do vento), podem ser utilizados em *softwares* específicos de cálculos mecânicos de linhas de transmissão, tais como o PLS-CADD (4). Estes cálculos visam determinar a temperatura máxima que os cabos poderão atingir, respeitando as alturas de segurança previstas nas normas técnicas (5), para a operação da linha em condições normais ou em emergência. Maiores detalhes são apresentados na seção 5.0.

4.0 - METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DA LINHA

A metodologia empregada para a obtenção e processamento das informações necessárias a um projeto de recapitação é detalhada a seguir.

4.1 Aquisição dos Dados

A obtenção dos dados de uma linha de transmissão é realizada através de um sobrevôo cobrindo uma área tipo corredor. O planejamento da missão, em termos de altura de vôo e ângulo de abertura do espelho, é programado de forma a atender a resolução e a precisão almejada para o levantamento. Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros de vôo frequentemente empregados em mapeamentos de linhas de transmissão.

TABELA 1 – Exemplo de Parâmetros de Vôo Empregados para Levantamentos de Linhas de Transmissão						
Altura (m)	Velocidade (km/h)	Ângulo (°)	Largura da Faixa (m)	Frequência do Laser (kHz)	Frequência da Varredura (kHz)	Resolução (pontos/m)
650	213	13	300	50	49,5	0,6

Ao mesmo tempo em que é realizada a varredura pelo LIDAR é feita uma filmagem da área levantada. Os pontos obtidos são gravados em um disco rígido enquanto a filmagem é gravada em fita VHS.

4.2 Processamento dos Dados Obtidos

A determinação das coordenadas X, Y e Z (cota) dos pontos coletados resulta da integração de informações das três tecnologias presentes no sistema de mapeamento a laser, conforme descritas na seção 2.0. Estas informações, em conjunto com dados de calibração do sistema, permitem o posicionamento das projeções dos feixes de laser nos objetos da superfície com alto grau de precisão.

Uma vez obtida a nuvem de pontos, a etapa seguinte consta da classificação dos obstáculos. Algoritmos de filtragem são empregados visando separar os pontos pertencentes ao terreno, aos cabos e às estruturas, dos demais obstáculos (2). A câmara de vídeo acoplada ao sistema possibilita uma classificação mais detalhada (p.ex diferentes tipos de vegetação, edificações, travessias, etc) dos diferentes obstáculos presentes ao longo do trecho.

4.2.1 Pontos no Terreno

O algoritmo empregado para classificação dos pontos do terreno consiste na construção de um modelo de triangulação da superfície. A rotina é inicializada através da definição de uma janela de classificação de dimensão tal que garanta que pelo menos um ponto dentro desse entorno tenha atingido o terreno. Em regiões urbanas, por exemplo, toma-se o tamanho da maior edificação.

Uma inspeção visual dos pontos classificados deve ser realizada de forma a garantir que pontos de vegetação não estejam sendo incluídos no modelo. A Figura 2 mostra os pontos classificados como terreno na cor laranja e os demais na cor verde.

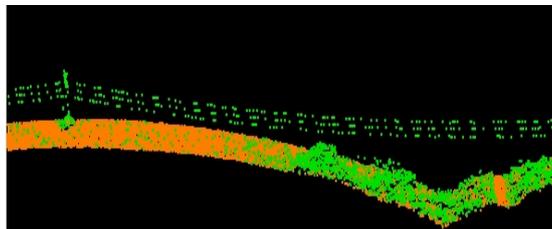


FIGURA 2 – Classificação dos Pontos no Terreno

4.2.2 Pontos dos Cabos

Para identificação dos pontos pertencentes aos cabos a rotina classifica os pontos que satisfazem à função matemática da catenária, bem como ajusta uma curva nos pontos para posterior vetorização da linha de transmissão (Figura 3).

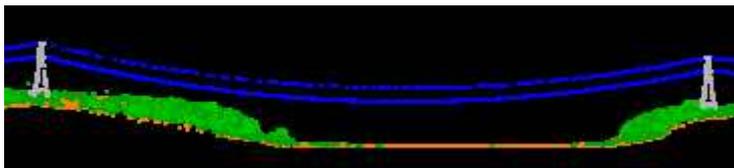


FIGURA 3 – Classificação dos Pontos dos Cabos (em azul)

4.2.3 Pontos das Estruturas

A classificação dos pontos pertencentes às estruturas de transmissão é realizada através da delimitação desses pontos a partir de identificação visual (Figura 4).

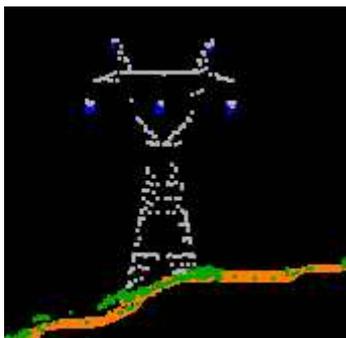


FIGURA 4 – Classificação dos Pontos das Estruturas

Pelo fato de muitas vezes o feixe de laser não atingir exatamente o centro da estrutura no solo, é necessária a geração de um modelo de superfície através da triangulação dos pontos do terreno (TIN – *Triangulated Irregular Network*). A localização do centro de cada torre é determinada a partir da vetorização da imagem de intensidade (imagem gerada a partir da intensidade de retorno do pulso de laser). Em seguida esses pontos são rebatidos no modelo de terreno para obtenção da elevação.

Para a classificação do centro das estruturas onde ocorre mudança de direção do alinhamento da linha utiliza-se a mesma metodologia, porém, estes pontos são incluídos em uma classe distinta e codificados como *vértices*.

4.2.4 Fixação do Cabo na Cadeia de Isoladores

Em muitos casos a partir do processo de classificação não é possível a determinação do ponto de fixação do cabo na cadeia de isoladores, pois o ponto pode não ter sido mapeado, havendo apenas pontos nas proximidades. A partir da vetorização dos cabos é possível a determinação do ponto de encontro dos mesmos.

A partir das curvas 3D obtidas pela vetorização dos cabos é possível a geração de um modelo digital de elevação representando uma superfície dos cabos da linha, que pode ser utilizada para a obtenção da elevação dos pontos na cadeia de isoladores.

4.2.5 Pontos Referentes aos Obstáculos sob os Cabos

Uma vez classificados os pontos pertencentes ao terreno, aos cabos e às estruturas, os pontos restantes são separados para classificação com o auxílio das imagens provenientes da câmera de vídeo.

Após as operações de sobrevôo, as fitas de vídeo em formato 8 mm são lidas para realização da captura das cenas de interesse. É possível navegar na gravação, fazendo-se a seleção e a captura de interesse no tamanho de 640 x 480 pixels, no formato JPEG. Na captura, pode-se definir qual a taxa de amostragem a ser utilizada, influenciando na sobreposição das cenas.

A identificação dos obstáculos é realizada com o auxílio das informações provenientes do LIDAR (tais como a altura dos objetos), obtida através da subtração dos modelos digitais de elevação e de terreno gerados a partir dos pontos do levantamento e a imagem gerada a partir da intensidade de retorno do feixe. Estas informações aliadas às imagens provenientes da câmera de vídeo permitem a delimitação dos obstáculos (Figura 5).

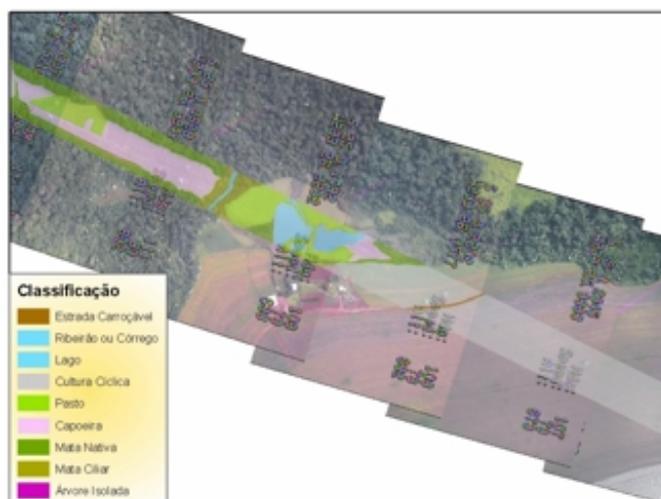


FIGURA 5 – Classificação dos Obstáculos

Os pontos classificados são então convertidos para um formato de arquivo compatível com o *software* PLS-CADD (4), onde cada ponto é identificado com um código descritivo (Tabela 3) e suas coordenadas X, Y e Z (cota).

Código	Descrição do obstáculo / ponto
200	Terreno
206	Vértice
.....	
224	Estrada municipal
.....	
232	Ferrovia não eletrificada
.....	
280	Cabo de LT de 69 kV
.....	

5.0 - APLICAÇÕES PRÁTICAS

Os estudos para a implementação do levantamento planialtimétrico por meio do LIDAR foram feitos pelo LACTEC para a COPEL, para as seguintes linhas de transmissão já construídas:

- LT Salto Caxias – Salto Santiago (500 kV): estudos iniciais em 2002/2003 (1),(2), num trecho de aproximadamente 20 km.
- LT's Salto Osório – Cascavel (230 kV), Foz do Chopim – Cascavel (230 kV) e LT Foz do Chopim – Pinheiros (138 kV), num trecho total de aproximadamente 80 km.

Este levantamento de 80 km inclui linhas paralelas em boa parte do trecho, estando prevista a recapitação da LT Salto Osório – Cascavel, com cabo CAA 795 kCM Drake, da temperatura de operação de 55 °C para 75 °C. Com a experiência obtida nestes estudos pode-se avaliar que o trabalho do projetista, em estudos similares de recapitação, poderá ser classificado em duas etapas distintas descritas abaixo como *Preparação dos Dados Topográficos* e *Projeto Eletromecânico*.

5.1 Preparação dos Dados Topográficos

Uma vez recebido o arquivo proveniente do LIDAR com os dados do levantamento planialtimétrico (descrito na seção anterior), os pontos são lidos pelo *software* PLS-CADD com o qual, de modo geral, a seguinte seqüência de procedimentos é necessária:

- Leitura de arquivos com pontos no formato XYZ (coordenadas X, Y e cota Z);
- Redução da quantidade de pontos (Figura 6), uma vez que o LIDAR pode fornecer um grande volume de pontos, em particular nos cabos e estruturas. Para tal, é conveniente o fornecimento de arquivos independentes para cada código de classificação dos obstáculos;

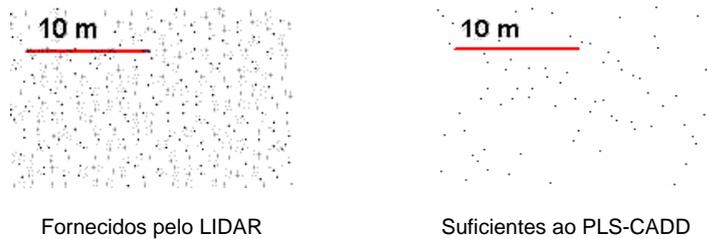


FIGURA 6 – Exemplo da “nuvem” de Pontos

- Utilização de *Break Lines* para refinamento do modelo, as quais tratam-se de arestas obrigatórias que representam leitos de rios, estradas ou qualquer outra linha natural que se encontra na superfície do terreno que se deseja modelar;
- Criação do modelo de grade triangular (TIN - *Triangular Irregular Network*) sobre os pontos remanescentes, com o qual será possível a visualização da superfície em 3D, incluindo cabos, estruturas e obstáculos (Figura 7);

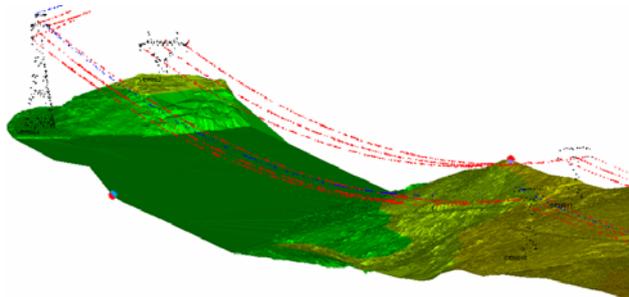


FIGURA 7 – Modelo 3D do Solo, Estruturas e Cabos

- Definição dos PI's (Pontos de Inflexão ou Vértices), obtendo-se assim um traçado (*Alignment*);
- Determinação de pontos interpolados sobre o eixo e os perfis laterais escolhidos, utilizando resultados do modelo TIN, obtendo os perfis necessários para a locação de estruturas (Figura 8);
- Eliminação adicional de pontos, caso necessário.

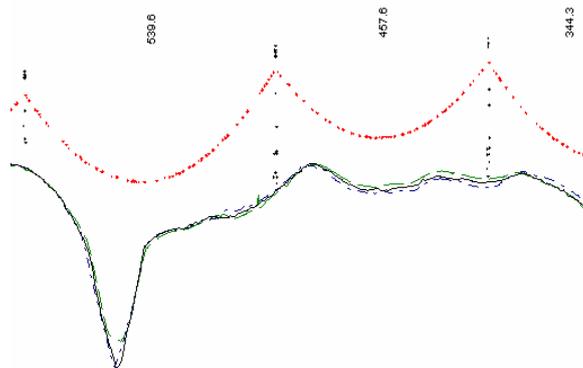


FIGURA 8 – Perfil Para a Locação (pontos XYZ)

5.2 Projeto Eletromecânico

Os pontos representativos das estruturas e cabos mostrados na Figura 8 ainda são pontos tipo XYZ, ou seja, não são interpretados pelo PLS-CADD propriamente como estruturas ou cabos, e servirão apenas como referência para a etapa seguinte. A seqüência abaixo descrita é relativamente rápida quando executada com comandos automatizados disponíveis no *software*, e consistem numa espécie de recuperação do projeto da LT, tomando como base os dados do LIDAR:

- 1) Localização de cada estrutura por meio dos arquivos de estruturas padronizados do PLS-CADD, na distância progressiva codificada no arquivo XYZ (comando *Structures/AutomaticSpotting/SpotAtFeatureCodes*);
- 2) Em cada estrutura assim locada, faz-se o ajuste do ponto de suspensão do cabo à respectiva cota codificada no arquivo XYZ, o que assegura o exato posicionamento do condutor relativamente à estrutura e ao solo (comando *Structures/AutomaticSpotting/SnapHeightToFeatureCode*);
- 3) Estimativa da temperatura do cabo condutor no instante do levantamento dos pontos. A metodologia sugerida por (7) pode ser utilizada, desde que conheça-se a temperatura ambiente, velocidade de vento e corrente elétrica transmitida pela LT (comando *Sections/IEEE Std738-1993*). Uma alternativa seria a medição direta da temperatura na superfície do cabo condutor;

- 4) Adição de cada tramo, utilizando para isto o arquivo do cabo correspondente (comando *Sections/Add*);

- 5) Ajuste da catenária do tramo adicionado no passo anterior, com a catenária de pontos fornecida pelo LIDAR (comando *Sections/Graphical Sag* – Figura 9);

- 6) O resultado do passo anterior é a tração do cabo (considerado usualmente nestes casos, na condição com *creep*), associada à temperatura do cabo no instante da medição. Para o tramo da Figura 9, o valor da tração para o cabo CAA 795 kCM Drake é de 26688 N (2721 kgf \cong 19,4% da carga de ruptura), na temperatura estimada de 32 °C, que resultou bastante coerente com os valores do projeto original desta LT;

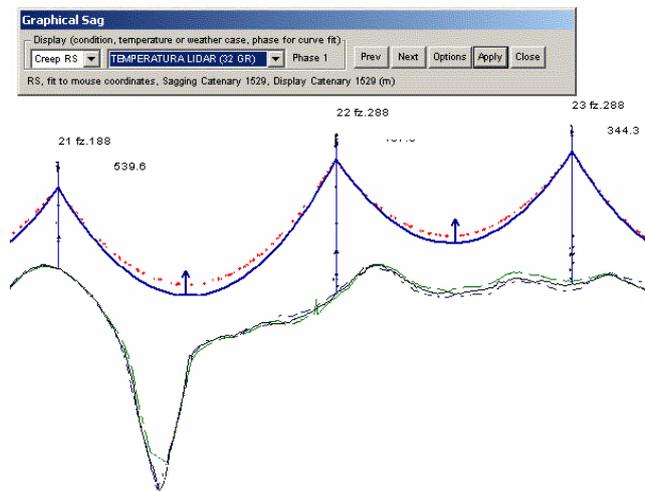


FIGURA 9 – Comando *Graphical Sag* (Ajuste da Catenária)

- 7) A partir deste valor de tração, pode-se extrapolar o posicionamento do cabo para outras temperaturas de projeto, viabilizando assim os estudos de recapacitação. A Figura 10 ilustra os resultados desta metodologia em um determinado tramo, indicando o posicionamento do cabo condutor na temperatura de recapacitação de 75 °C;

- 8) Este processo deve ser repetido para cada tramo

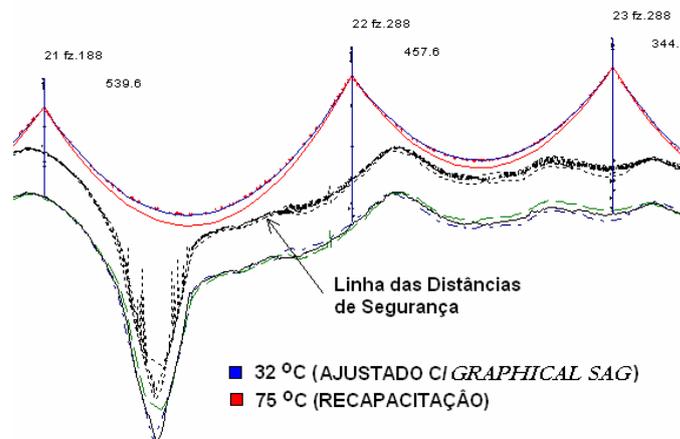


FIGURA 10 – Projeto de Recapacitação

6.0 - CONCLUSÕES

O Sistema de Mapeamento Digital a Laser (LIDAR) mostra-se como uma ferramenta precisa, moderna e de grande versatilidade em projetos de linhas de transmissão, sendo aplicável tanto para linhas novas (em estudos de traçados e no projeto executivo) como em recapacitação de linhas existentes.

Mostrou-se que em projetos de recapacitação, o LIDAR possibilita a determinação das condições reais das linhas de transmissão existentes de forma rápida e com um mínimo de trabalho de campo, em termos de posição dos cabos, das estruturas e do solo ao longo da faixa de passagem. Com os dados obtidos da situação física da linha e com programas computacionais específicos (PLS-CADD ou similar), determinam-se às condições máximas possíveis de temperatura dos cabos para que sejam respeitadas as alturas de segurança. Com os dados obtidos, e uma vez determinada a ampacidade da linha, a realização de estudos para a adequação da linha a novos valores de ampacidade (recapacitação) fica bastante facilitada, sendo rapidamente realizada e implantada de forma precisa.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Müller, Mauricio; Calmon, Ana Teresa. Pesquisa de integração de sistemas de informações geográficas – SIG com outros sistemas visando o lançamento preliminar de linhas de transmissão de energia elétrica. Relatório parcial CEHPAR LACTEC. Curitiba. 2002.
- (2) Baungarten, Ana Paula; Müller, Mauricio. Pesquisa de integração de Sistema de Informações Geográficas – SIG com outros sistemas, visando o lançamento preliminar de linhas de transmissão de energia elétrica. Relatório final. CEHPAR LACTEC. Curitiba. 2003.
- (3) Wehr, Aloysius; Lohr, Uwe. Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 68–82. 1999.
- (4) Hoffmann, João Nelson. Otimização de Projetos de Linhas de Transmissão em Ambiente Computacional com Interface Amigável (Software PLS-cadd)– XIV SNPTEE, 1997.
- (5) ABNT. NBR 5422. Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. 1985.
- (6) Bichels, Arlei; Müller, Mauricio; Baungarten, Ana Paula; Hoffmann, João N. Determinação das Condições Reais de Utilização de Linhas Aéreas de Transmissão com Mapeamento Digital a Laser – IX SEPOPE, 2004.
- (7) IEEE Standard for calculating the current/temperature relationship of bare overhead conductors. IEEE Std 738-1993.
- (8) Koop, J. E. Advanced technology for transmission line modeling. Transmission & Distribution World. April. 2002.
- (9) Müller, Mauricio; Groszewicz, Ralph. C.; Calmon, Ana Teresa. O Perfilador Laser e suas Aplicações na Distribuição de Energia Elétrica. In: XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2002, Salvador. Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. 2002.