

Recapacitação de Linhas de Transmissão Subterrâneas com uso de solo Termicamente Estabilizado

Geraldo Roberto de Almeida (Matrix) , Gil Fortes Vasconcelos (USP / Enerq), Ruy Augusto de Lima (Matrix), Ivan Teixeira de Oliveira (Matrix), Carla Damasceno Peixoto (Light)

Resumo- *Este trabalho é o relatório de um desenvolvimento tecnológico com objetivo de recapacitar duas linhas de transmissão subterrânea de 138 KV, com cabos isolados em papel impregnado, do tipo óleo fluido (OF), com condutores ocos de alumínio, formação segmentada do tipo “conci”. Os cabos possuem capas metálicas de liga de chumbo, com cintamento de fitas de cobre e cobertura anti corrosiva de polietileno. Essas linhas são de propriedade da LIGHT e interligam as subestações CORDOVIL e BRÁS DE PINA, na cidade do Rio de Janeiro.*

As linhas de Transmissão Subterrâneas anteriormente citadas foram instaladas em 1977 e apresentaram em meados dos anos 90 um processo de instabilidade térmica do “backfill” (material de reaterro nas circunstâncias imediata dos cabos) devido à alguma sobrecarga prolongada que trouxe a migração de umidade ao redor do cabo levando os mesmos a funcionarem à uma temperatura maior, que por sua vez realimentava o processo de migração de umidade, levando o sistema a instabilidade termo hidrológica.

Para não perder totalmente essas linhas a potência transmitida foi reduzida, de modo que não se superasse a classe térmica dos cabos. As soluções de engenharia para a solução do problema caminhavam para a construção de uma nova linha, ou alternativamente, à solução de recapacitação através de troca do backfill, objeto deste trabalho.

Este trabalho foi conduzido dentro do programa de P&D da ANEEL, dentro da concessionária LIGHT e este relatório apresenta as principais fases do trabalho de recapacitação, com ênfase especial à seleção e aplicação do material de reaterro, técnicas de execução dos serviços com as linhas energizadas, bem como na tecnologia de monitoração da temperatura da superfície externa dos cabos como informação extrema do desempenho dos cabos da linha recapacitada.

Palavras-chave— Transmissão Subterrânea; Cabos de Potência; Cabos Diretamente Enterrados; Solos Termicamente Estáveis; Resistividade Térmica dos Solos.

I. INTRODUÇÃO

A estabilidade hidrológica dos solos tem afetado a humanidade desde tempos imemoriais. A face da terra tem mudado ao longo dos milênios tendo como explicação a forte migração de índices de água na massa de terra.

Quando cabos de potência são instalados diretamente enterrados eles sofrem também da variável da quantidade de água no meio circunstante e neste caso agravado devido ao gradiente térmico que aparece entre a superfície externa do cabo e o solo (meio) externo.

Os cabos de potência modernos podem operar em regime térmico contínuo de até 90°C no condutor, mas no passado estas temperaturas de operação eram da ordem de 70°C, o que até certo ponto podem explicar a inexistência de mecanismo de instabilidade termo hidrológica nos solos antes dos anos 60.

O primeiro caso de instabilidade termo hidrológica que levou à falha de um cabo 132 kV é relatado na Inglaterra no começo dos anos 60. O cabo era um GAS FILLED classe 132 kV que perfurou eletricamente numa região sobre o HIDE PARK em LONDRES. Naquele tempo a Inglaterra passava por uma grande seca e a causa imputada para a falha foi a instabilidade termo hidrológica gerada pela migração de umidade do solo, com a sucção da grama do parque, acoplada ao gradiente térmico dos cabos instalados sobre o parque.

O problema desencadeou vários estudos sobre o fenômeno e duas linhas se apresentaram como o melhor enfoque: (1) Tratar o solo como um meio não homogêneo onde uma parte dele seria considerado totalmente seca e a outra saturada de umidade, cada uma com sua resistividade específica e (2) Tratar o solo como um meio homogêneo onde a região instável fosse substituída por um material termo – hidrológicamente estável.

O primeiro enfoque teve em G. Luoni [1] a maior contribuição, pois permitia tratar o solo como meio não homogêneo com um número qualquer de componente não homogênea.

O segundo enfoque tem na literatura moderna, Phillip and De Vries [2,3] como o pioneiro a buscar um modelo mecânico que pudesse descrever o mecanismo de transferência de calor e massa em meios porosos orientado todavia para a

AGRICULTURA. No início dos anos 70 F. Donazzi [4] e outros desenvolveram uma melhoria no modelo anterior permitindo a partir de medidas de parâmetros simples de grau de saturação do solo, prever o prelúdio do mecanismo de instabilidade térmica. Finalmente nos anos 80 Brackelmann [5] apresenta um modelo alternativo, também simples, que trata o problema através da “isoterma crítica”, dentro da qual toda a umidade migraria e fora da qual o meio seria estável.

Em 1987 J. R. Bártoli e G. R. de Almeida [6] apresentam uma solução com material estabilizado que conjugado com o enfoque de G. Luoni pode operar mesmo totalmente seco.

A recapitação das linhas de transmissão através da troca de backfill e toda tecnologia de construção e controle de temperatura foram implementadas em escala real nas linhas de transmissão em referência gerando o estudo de um caso em escala real. Neste trabalho estão apresentadas todas as fases deste caso executado sobre as linha CORDOVIL / BRÁS DE PINA da LIGHT.

II. O ESTADO TUAL DA ARTE

As linhas de transmissão com cabos diretamente enterrados são executadas através de valas escavadas em vias públicas e os cabos são instalados em formação plana ou em trifólio. Quando as seções são menores que 630mm² para o cobre ou 1000 mm² para o alumínio a formação em trifólio é a mais adequada. Na figura 1 a seguir é mostrado o corte da vala dos cabos 138kV instalados entre as subestações CORDOVIL e BRÁS DE PINA da LIGHT.

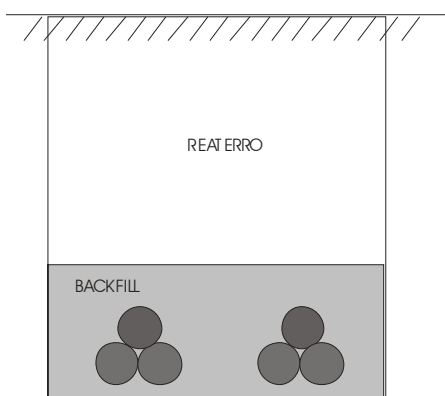
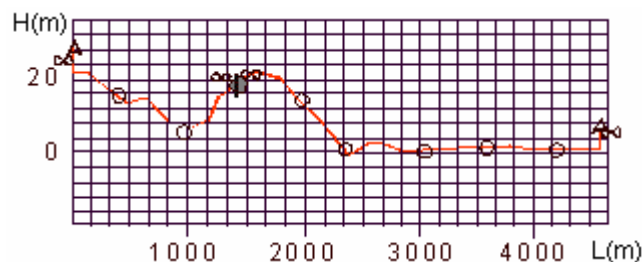


FIGURA 1
VALA PARA 2 CIRCUITOS

Quando os cabos forem do tipo OF além dos aspectos térmicos e elétricos, os aspectos hidráulicos não podem ser negligenciados. Os cabos OFs são na concepção mais simplificada uma linha hidráulica modelada como um tubo em U. No estado atual da arte é necessário o conhecimento do perfil altimétrico (figura 2) da linha para que se conheça os valores das pressões estáticas e dinâmicas envolvidas durante o ciclo de variação de carga.

FIGURA 2
PERFIL ALTIMÉTRICO DA LINHA



O cabo do tipo OF possui uma construção especial: o condutor é geralmente oco, o isolamento é um enfaixamento de papel impregnado em óleo, existe uma capa metálica (no caso chumbo) que provê o fechamento do óleo isolante, e é reforçada por fitas de cobre ou bronze e todo o conjunto anterior é protegido por uma capa externa isolante de polietileno ou PVC. Na figura 3 a seguir está ilustrada a construção descrita anteriormente.

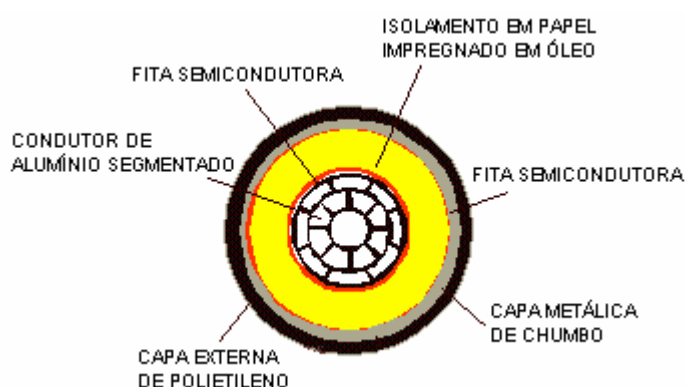


FIGURA 3
CORTE TRANSVERSAL DE UM CABO OF

CAUSAS DE INSTABILIDADE TÉRMICA

Nos cabos do tipo OF as causas de instabilidade podem ser INTERNAS ou EXTERNAS. As causas internas estão associadas à instabilidade térmica do dielétrico e esta por sua vez está associada à contaminação ou envelhecimento acelerado do papel impregnado. Se o cabo estiver funcionando as causas internas podem ser eliminadas resultando apenas causas externas.

As causas externas podem ser classificadas em 4 modalidades conhecidas e assim caracterizadas: (1) Solos desérticos e/ou em regiões de baixos índices pluviométricos; (2) Solos situados sob vegetação gramínea; (3) Solos onde existem cabos submetidos à sobrecarga prolongada e (4) Backfill com alta porosidade¹.

SOLOS DESÉRTICOS E/OU DE BAIXO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO

Os solos desérticos mais conhecidos estão no ORIENTE MÉDIO, mas especificamente no IRAK, KUWAIT onde uma grande quantidade de cabos AT subterrâneos foram

¹ O backfill é dito de alta porosidade quando apresenta uma baixa densidade de compactação. A densidade baixa decorre de vários motivos, entre outros, uma granulometria inadequada ou má qualidade da compactação

instalados. A cidade de LIMA no Peru também é considerada uma região de baixo índice pluviométrico e portanto cabos lá instalados são projetados com backfill secos.

SOLOS SOB VEGETAÇÃO GRAMÍNEA

O primeiro caso antológico de instabilidade térmica hidrológica, foi relatado em situação do caso acima. Evidentemente que no caso relatado o processo de falha elétrica por instabilidade termo hidrológica foi facilitada por um grande período de seca.

CABOS SUBMETIDOS À SOBRECARGA

A temperatura máxima de funcionamento em regime de operação normal é de 90°C para cabos isolados em papel impregnado em óleo ou para, os extrudados. Ambas construções possuem uma temperatura de sobrecarga da ordem de 105°C (temperaturas de 130°C devem ser evitadas). Quando os tempos de sobrecargas de 100 horas são reivindicados, uma notável espessura de solo em torno do cabo estará seca, pois a 100°C toda umidade está em fase vapor e deve migrar para regiões remotas da vizinhança dos cabos. Tempos de 100 horas é idêntico a constante de tempo dos transitórios térmicos dos cabos diretamente enterrados, por isso os materiais de backfill deveriam ser **TERMICAMENTE ESTABILIZADOS** para que o fenômeno da instabilidade não fosse disparado.

BACKFILL COM ALTA POROSIDADE

Esta condição está presente quando o material de backfill não é convenientemente compactado, ou quando a OBRA CIVIL é feita com materiais inadequados. A porosidade do backfill pode ser controlada no campo através de medição do grau de densidade do backfill compactado.

III. LEVANTAMENTO DOS MATERIAIS DISPONÍVEIS

O melhor material para reaterro dos cabos que são instalados diretamente enterrados são os materiais disponíveis na natureza e que não necessitam de tratamento para seu condicionamento. Todavia, quando existe necessidade de desempenho especial outros materiais tornam-se necessários. Os materiais naturais que não necessitam de tratamento são denominados **AREIAS SELECIONADAS** e são encontradas nos leitos dos rios e em cavas de areias. Excetuando estas areias selecionadas todos os demais materiais são considerados artificiais.

Quando o backfill for natural do tipo areia selecionada deve se ter em conta o caráter estatístico da distribuição dos grãos. Esta distribuição se dá por processos geológicos e lavagem quando o material está no leito dos rios. Na figura 4 a seguir é apresentada a curva granulométrica no seu limite inferior de uso para material de reaterro.

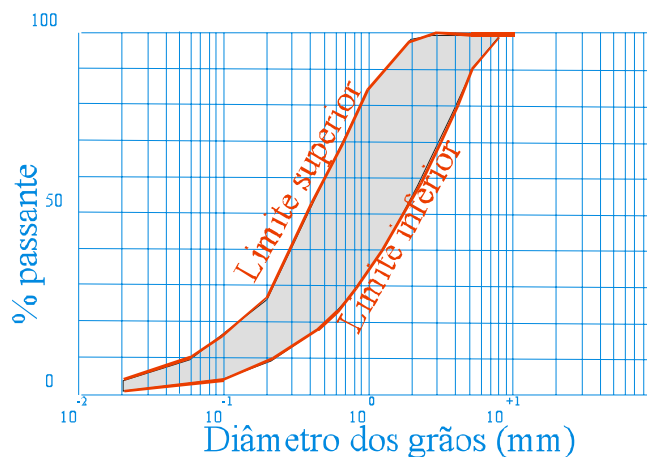


FIGURA 4
FAIXA DE UTILIZAÇÃO DE AREIAS SELECIONADAS

Quando o backfill for artificial ele pode ser uma mistura de areia e cimento denominada ARGAMASSA, ou pode ser um material bimodal constituído de pedregulho e pó de pedra. Este material é denominado **BIMODAL** e sua granulometria e aparência pode ser vista nas figuras 5 e 6 respectivamente.

Na figura 5 está apresentada a granulometria dos grãos bimodais, onde os aspectos das modas aparecem na formação do conjunto de grossos e finos. Na figura 6 é visto a aparência dos dois conjuntos para uma amostra de material de uma pedreira onde foi prospectado.

Moda de grossos

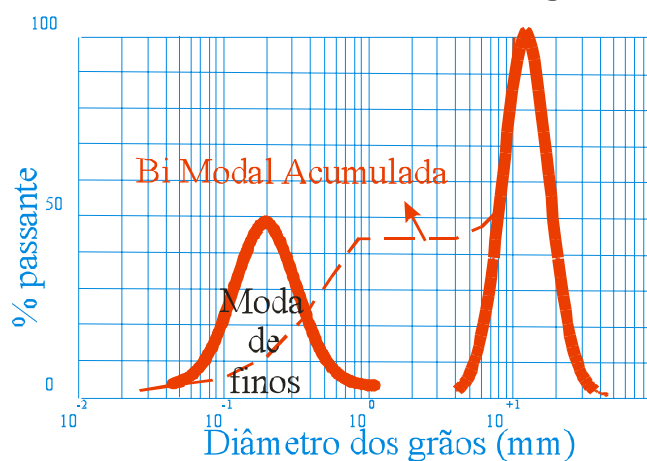


FIGURA 5
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRICA DO MATERIAL BIMODAL



FIGURA 6
APARÊNCIA DO MATERIAL BIMODAL

Os aditivos mais usados para condicionamento de backfill são: (1) Creme de parafina (40% de sólidos), (2) Cera líquida (30% de sólidos), (3) Látex de estireno (48% de sólidos), (4) Teores adicionados 6% a 10% por massa de granito moído, (5) Grafite e (6) Resíduo siderúrgico, além de cimento em vários traços. Para a recapacitação do projeto em referência foi usado o material bimodal na composição de 60% de grossos (brita zero) e 40% de finos (pó de pedra).

IV. ALTERNATIVAS TÉCNICO - ECONÔMICAS

A resistividade térmica do solo (backfill) do projeto original na linha CORDOVIL - BRAZ DE PINA era $1,0^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$, sendo este o valor de restrição para qualquer das alternativas prospectadas.

ALTERNATIVAS TÉCNICAS

Varrendo desde materiais naturais até os artificiais encontramos os seguintes valores de resistividades em função da máxima compactação, conforme ilustra a figura 7 a seguir. Na fig 7 todos os materiais incluídos na fronteira da Fig 5 e o material bimodal da fig 5 foram investigados e o material bimodal foi eleito como o melhor material técnico e econômico, considerando que a adição de qualquer aditivo, aumentava os custos sem adicionar benefício à redução da resistividade térmica.

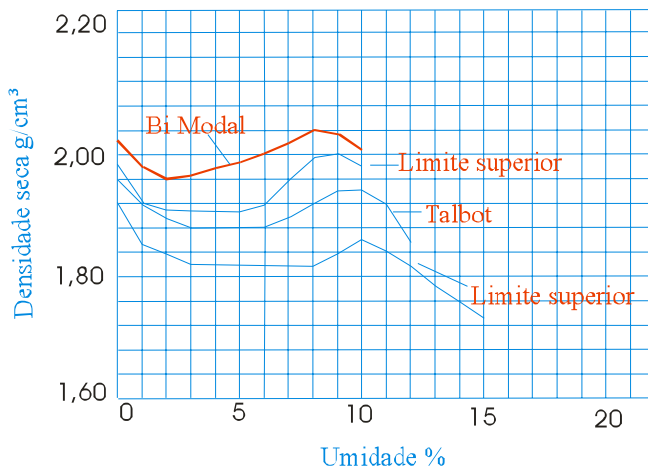
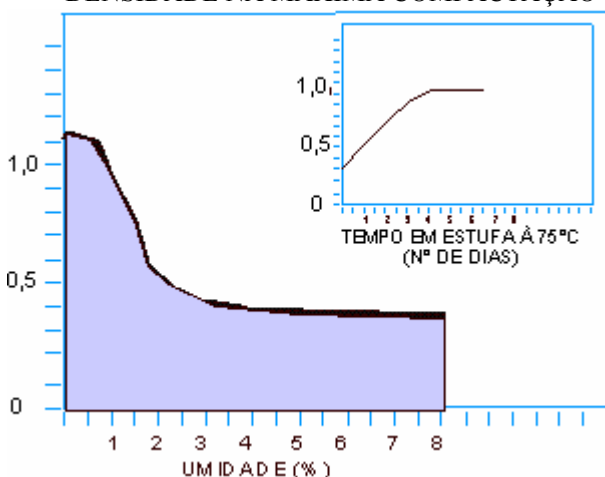


FIGURA 7

DENSIDADE NA MÁXIMA COMPACTAÇÃO



A aferição da resistividade foi feita através de várias amostras onde a resistividade era medida com vários teores de umidade. A figura 8 mostra o andamento da resistividade em função do teor de umidade na máxima compactação.

FIGURA 8
RESISTIVIDADE x TEOR DE UMIDADE

V. ENSAIOS E MEDIÇÕES

Os ensaios foram concentrados em escolher o material que tivesse uma resistividade térmica menor ou igual àquela de projeto ($1,0^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$).



FIGURA 9
SONDA E MÓDULO DE COMPACTAÇÃO

A medida da resistividade térmica foi feita com sonda filiforme, com fonte de calor distribuída ao longo do corpo cilíndrico e detentor de temperatura no centro da haste filiforme. Na figura 9 é mostrado o módulo de compactação com a sonda filiforme acoplada no centro. Na figura 10 é apresentado o sistema de aquisição de dados da sonda com o PC de tratamento dos dados.



FIGURA 10
SISTEMA DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE

PEDREIRA	COMPACTAÇÃO	
	SECO	ÚMIDO
Ibrata Mineração	1,32°C.m/W	1,07°C.m/W
Pedreira São Pedro	1,40°C.m/W	1,11°C.m/W

TABELA 1
RESULTADO DOS MELHORES MATERIAIS

VI. TÉCNICA DE CONSTRUÇÃO

As atividades de construção seguiram as seguintes etapas: (1)Escavações, (2)Instalação do cabo de fibra óptica e sensores, (3)Aplicação e controle do backfill, (4)Reaterro, (5)Recomposição da pavimentação.

Algumas etapas diferem daquelas mais simples de execução de uma vala e seu fechamento. Ressaltam-se que os trabalhos foram realizados com os circuitos energizados. Nestas etapas está aquela de instalação dos sensores térmicos e da fibra óptica, que foi amarrado, de metro em metro, solidamente ao cabo superior de cada trifólio. Este cabo é constituído de seis(6) fibras das quais duas(2) foram usadas no sistema de medição de temperatura em tempo real, enquanto que as demais foram preservadas como reserva e/ou instalação de um sistema de medição de temperatura mais avançado.

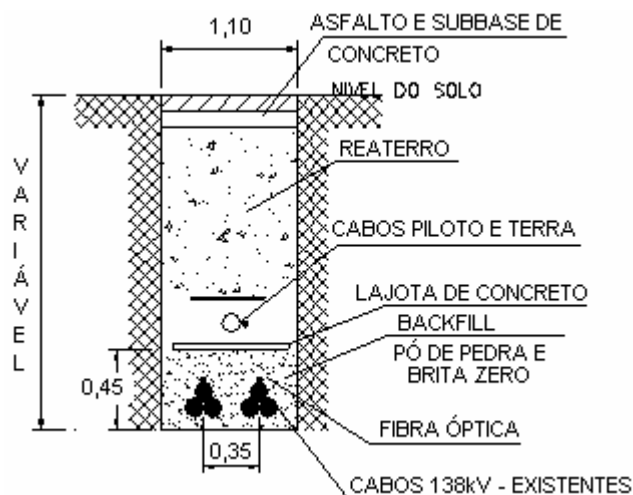


FIGURA 11
CORTE DE VALA NA TÉCNICA DE CONSTRUÇÃO

VII. IMPLEMENTAÇÃO EM ÁREA PILOTO

A área piloto para a implantação do experimento tecnológico em escala real foi os primeiros 1500 metros a partir da SE CORDOVIL.



FIGURA 12
VISTA DO CORTE DE VALA NA ÁREA PILOTO
ANTES DA APLICAÇÃO DO BACKFILL

Tendo sido executado todo o trabalho conforme descrito anteriormente restava apenas validar o projeto de recapitação dos cabos 1000mm², condutor de alumínio 138kV, isolamento em papel impregnado em óleo(OI):

SITUAÇÃO ORIGINAL

Backfill composto de areia, resistividade térmica do solo 2,8°C.m/W

Regime normal – 1 circuito em carga: 81MVA
2 circuitos em carga: 63MVA

SITUAÇÃO APÓS A TROCA DO BACKFILL

Substituição da areia pelo backfill bimodal, resistividade térmica 1,1°C.m/W

Regime normal – 1 circuito em carga: 124MVA

2 circuitos em carga: 100MVA

O acréscimo aos valores nominais derivam do avanço tecnológico do novo material bimodal que quando compactado na máxima densidade tem valores baixos de resistividade térmica sem serem sensíveis ao mecanismo de migração de umidade.

VIII. MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

Para usufruir de todas as margens de transporte de potência nos circuitos das linhas de transmissão Cordovil/Brás de Pina recapitados, torna-se necessário monitorar a temperatura de exercício dos cabos em tempo real.

No estado da arte levantado no mercado nacional e internacional existem na prática 3(três) modos de fazer este tipo de monitoramento:

A) Sistema de Medição Pontual sem Transmissão de Sinais (leituras locais)

Neste sistema as medições de temperaturas são realizadas sobre a cobertura externa dos cabos (ambos os circuitos) em localidades a serem definidos previamente no percurso da linha (duas ao longo dos cabos e emendas sob as ruas e a terceira nas proximidades dos terminais dentro da subestação), sendo os sensores empregados do tipo termo resistência de Platina (RTD), conectados a respectiva unidade de aquisição (leitura no próprio local). Algumas desvantagens são as necessidades de alimentação elétrica para cada unidade de aquisição e de instalação das caixas de proteção dos dispositivos de medição locais. Além disso, devido a falta de um sistema de transmissão dos dados até uma unidade central, periodicamente um funcionário deveria ser deslocado a cada unidade para leitura das medições (método pouco confiável pela descontinuidade das medições no tempo e os dados das demais remotas não serem simultâneos para sua avaliação).

B) Sistema de Medição Pontual com Transmissão de Sinais (leituras remotas)

As medições de temperaturas são realizadas da mesma forma que o modo anterior, porém é empregado um par de fibras ópticas de cada circuito para interligação em rede feita por interfaces eletro-ópticas entre as remotas e uma unidade central (constituída por um controlador microprocessador ou por um PC conectado a um conversor RS232/RS485). Apresenta as mesmas desvantagens do item anterior, exceto pela disponibilidade de dados à distância pela rede óptica, o que favorece a análise dos dados de medição na subestação para cada localidade de remota e com simultaneidade. A figura 13 representa a rede que foi implementada nas linhas de transmissão em referência, com os

componentes básicos agrupados por localidade. O sistema apresenta nas unidades remotas entradas analógicas para medições de temperaturas (entradas para sinal de resistência RTD); na unidade central há duas entradas para transdutores de temperatura (entradas de sinal de corrente 4-20 mA) e são previstas outras seis entradas (sinal de tensão 0-10Vcc) para transdutores de corrente de carga de ambos os circuitos (provenientes da medição da Light) no interior da sala de controle da subestação Cordovil. A rede óptica tem topologia em estrela (usando um par de fibras entre a unidade central e cada localidade remota (tres). Para o comprimento monitorado da linha (1500 metros) é suficiente o monitoramento em três localidades sob condições de instalação distintas (incluindo o terminal de cabos), podendo no futuro ser expandido para incorporar localidades do restante da linha (demais 3000 metros até a outra subestação). No lado RS485 (meio elétrico a dois fios, tipo half-duplex) podem ser interligados até 30 dispositivos de medição (escravos da série 7000) no barramento de cada localidade, os quais tem um endereço distinto para as chamadas por polling provenientes do Mestre (PC ou controlador). Para a comunicação desse sistema com o sistema da concessionária (para descarga dos dados ou monitoração por um sistema de supervisão e controle) será usado a interface de rede Ethernet padrão 10/100 Mbps (disponível no PC ou controlador instalado na sala de controle), e a Light adequou este sinal aos meios de telecomunicação disponíveis no seu Centro de Operações (COR).

C) Sistema de Medição Distribuído (medição usando as próprias fibras ópticas)

Este sistema consiste na forma ideal para medição das temperaturas na linha, pois permite a monitoração de qualquer ponto ao longo da linha (com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e resolução espacial média de 1 metro usando as fibras ópticas do tipo multimodo), identificando assim qualquer ponto quente da linha a qualquer momento e com leitura a distância (no equipamento DTS instalado na subestação).

Os três sistemas apresentados possuem vantagens e desvantagens quando comparados entre si. No caso em questão, por motivos da relação custo x benefício, foi adotado o sistema de monitoramento indicado na alínea B, vide figura 13. Futuramente poderá ser também instalado o sistema de monitoramento mais moderno, descrito na alínea C.

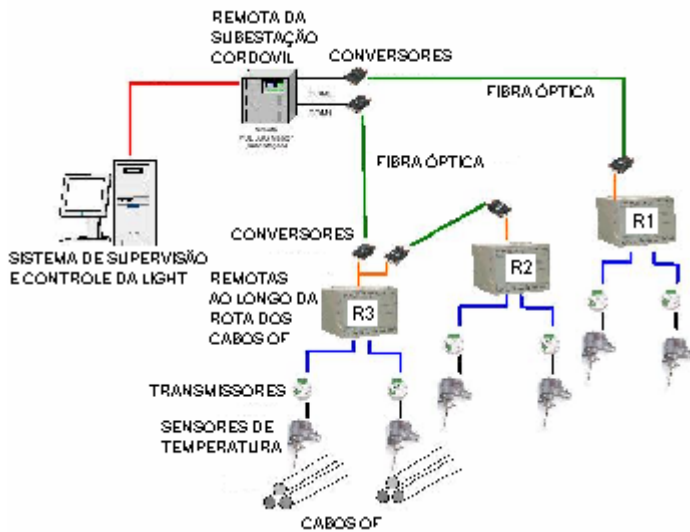


FIGURA 13
SISTEMA DE MEDIÇÃO PONTUAL COM TRANSMISSÃO DE SINAIS PARA O CENTRO DE OPERAÇÃO E CONTROLE

IX. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O desenvolvimento do projeto, com a implantação do projeto piloto alcançou o resultado previsto e esperado pelos participantes.
- As tecnologias aplicadas e as informações surgidas e difundidas através das reuniões de acompanhamento do andamento do projeto e de workshop realizado serão objeto de difusão do conhecimento e transferência do conhecimento adquirido.
- A experiência conseguida na solução de pendências durante a execução da obra também foi de grande valia.
- Os diversos tipos de solos encontrados no trajeto dos circuitos (desde o solo seco até o encharcado) produziram soluções diferenciadas para atender os objetivos do projeto.
- As conclusões apresentadas poderão ser transformadas em padrões a serem utilizados pela Light em futuras situações similares.

X. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à LIGHT e a ANEEL, a primeira pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho e a ambos pela oportunidade de divulgá-lo.

XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Luoni, A. Morello and H.W. Holdup, " The Calculation of External Thermal Resistance of Cables Laid in Materials Having Different Thermal Resistivities" Proc IEE Vol. 119, 1972 pp 575-585.
- [2] J. R. Philip and D. A. De Vries, "Moisture Movement in Porous Media Under Temperature Gradients" Trans. Am Geophys. Union Vol. 38 pp. 222-232, 1957.
- [3] D. A. De Vries. "Simultaneous [Transfer of Heat and Moisture in Porous Media" Am. Geophys. Union Vol. 39 pp. 909-916 1958
- [4] F. Donazzi, E. Occhini and A. Seppi. "Soil Thermal and Hydrological Characteristics in Designing Underground Cables" Proc IEE Vol. 126 1979 pp 506-516.
- [5] H. Brackelmann Physical Principles and Calculation Methods of Moisture and heat Transfer in Cable Trenches, BERLIM, 1984 (VDE-VERLAG ETZ report 19).
- [6] J. R. Bartoli and G. R. de Almeida " Cabos de Potencia em Solos Parcialmente Seco – Experimentação Sobre Modelos Estacionários " ANAIS COBEM 07 – FLORIANÓPOLIS 1987 pp 105-108
- [7] Recapitação de Linhas de Transmissão Subterrânea com Uso de Solo Termicamente Estabilizado Projeto de P&D do programa LIGHT (exercício2003-2004) sob o número P&D 03-03-31