**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE**

ROGÉRIO ALENCAR BIMBATO ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA
DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE RESISTIVIDADE TÉRMICA
EQUIVALENTE DO CONJUNTO BACKFILL, MATERIAL DE REATERRO E
SOLO NATIVO, TENDO EM VISTA O DIMENSIONAMENTO DE CABOS
SUBTERRÂNEOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

São Paulo

2021

ROGÉRIO ALENCAR BIMBATO ROCHA

Desenvolvimento de metodologia alternativa para determinação dos valores de resistividade térmica equivalente do conjunto *backfill*, material de reaterro e solo nativo, tendo em vista o dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica

Versão corrigida

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Tecnologia da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo G. Kanashiro.

São Paulo

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Rocha, Rogério Alencar Bimbato.

Desenvolvimento de metodologia alternativa para determinação dos valores de resistividade térmica equivalente do conjunto backfill, material de reaterro e solo nativo, tendo em vista o dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica. /Rogério Alencar Bimbato Rocha; orientador: Arnaldo Gakiya Kanashiro. – São Paulo, 2021.

105 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Linhas subterrâneas de transmissão de energia. 2. Resistividade térmica. I. Título.

Elaborado por Maria da Penha da Silva Oliveira. CBR-8/6961

Nome: ROCHA, Rogério Alencar Bimbato

Título: Desenvolvimento de metodologia alternativa para determinação dos valores de resistividade térmica equivalente do conjunto *backfill*, material de reaterro e solo nativo, tendo em vista o dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 10 de março de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Hédio Tatizawa

Instituição: PPGE - IEE / USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Julio Roberto Bartoli

Instituição: UNICAMP

Julgamento: Aprovado

Dr. Geraldo Roberto de Almeida

Instituição: TECHSYS

Julgamento: Aprovado

AGRADECIMENTOS

A Deus, Criador de todas as coisas, que concede a nós, criaturas, a graça de contribuir com a evolução de sua obra-prima.

Aos meus pais Arlindo e Maria, e avós Antonio e Gessy (todos *in memoriam*), que nunca mediram esforços para criar as condições necessárias para que eu pudesse construir uma vida digna e honrada.

À minha esposa Roberta, e filhas Milena e Mariana, não somente por ter compreendido meus momentos de ausência em razão da dedicação à esta obra, mas principalmente pelo incentivo e apoio ao longo de todo este trajeto.

Àqueles amigos que atuaram como grandes Mentores, me incentivando, orientando e impulsionando de maneira especial nesta caminhada: Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro, Eduardo Silva Acre, Dr. Geraldo Roberto de Almeida, Gilmar C. Domingues Filho, Rogério Carneiro da Silva, Roberto Silva Vieira, Sergio Luiz Caparroz, Walter Pinheiro, entre outros.

Às empresas: Enel Distribuição São Paulo, TAG Engenharia, Techsys, EDS Engenharia, pela parceria e suporte em etapas importantes deste trabalho.

A todos os demais que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, por estarem ao meu lado, me apoiando nesta importante etapa do meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

ROCHA, Rogério Alencar Bimbato. **Desenvolvimento de metodologia alternativa para determinação dos valores de resistividade térmica equivalente do conjunto *backfill*, material de reaterro e solo nativo, tendo em vista o dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica.** 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2021.

O desenvolvimento desta dissertação teve por principal objetivo apresentar metodologia alternativa para determinação da resistividade térmica equivalente do meio que circunda os cabos isolados de uma linha de transmissão subterrânea, quais sejam: o *backfill* (material de preenchimento da vala onde os cabos são instalados), material de reaterro sobre o *backfill* e solo natural. A resistividade térmica é a variável de maior relevância nos cálculos de dimensionamento dos condutores de uma linha de transmissão subterrânea, no entanto, sob a ótica científica, mesmo nos dias ainda há pontos não totalmente explorados em torno desta questão. O levantamento do estado da arte abrange a fundamentação teórica em torno do assunto, bem como os materiais, normas, metodologias e as práticas utilizadas ao redor mundo, envolvendo trabalhos importantes de diversos estudiosos do tema. A metodologia alternativa para determinação da assinatura ambiental proposta neste trabalho avança sobre a abordagem lastreada na mecânica do meio contínuo, utilizando algoritmos matemáticos baseados em transformada conforme, centrada na mecânica estatística. Nesta abordagem o condutor de um cabo isolado para alta tensão diretamente enterrado seria um *Ensemble Canônico*, ou seja, o cabo é um sistema no sentido de Gibbs, imerso em um reservatório (poço termodinâmico) infinito no qual as funções de estado $\{P \text{ e } T\}$ flutuam de modo estável (equilíbrio). Ao final, são apresentados exemplos de aplicação desta metodologia, comparando-se os resultados àqueles obtidos pelas metodologias que representam o estado da arte.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão subterrâneas. Resistividade térmica. Backfill. Transformada conforme.

ABSTRACT

ROCHA, Rogério Alencar Bimbato. **Development of an alternative methodology for determining the thermal resistivity values of the set backfill, filling material over backfill, and native soil, in view of the rating calculation of underground electric power transmission cables.** 2021. 105 f. master's thesis (Master in Energy) – Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, 2021.

The main objective of this dissertation was to present an alternative methodology for determining the equivalent thermal resistivity of the environment around the insulated cables of an underground transmission line, namely: the backfill (material for filling the ditch where the cables are installed), filling material on the backfill and natural soil. Thermal resistivity is the most relevant variable in the dimensioning calculations of the conductors of an underground transmission line, however, under the scientific perspective, even in the days there are still points not fully explored around this issue. The survey of the state of the art covers the theoretical foundation around the subject, as well as the materials, standards, methodologies and practices used around the world, involving important works by several scholars on the subject. The alternative methodology for determining the environmental print proposed in this work advances on the approach supported by the mechanics of the continuous environment, using mathematical algorithms based on a conform transform, centered on statistical mechanics. In this approach the conductor of an insulated cable for high voltage directly buried would be a Canonical Ensemble, that is, the cable is a system in the Gibbs sense, immersed in an infinite reservoir (thermodynamic well) in which the $\{P$ and $T\}$ state functions float in a stable (equilibrium) manner. At the end, examples of application of this methodology are presented, comparing the results to those obtained by the methodologies that represent the state of the art.

Keywords: Underground transmission lines. Thermal resistivity. Backfill. Conformal transformation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. 1 - Corte típico: banco de dutos de linha de transmissão subterrânea.	19
Figura 2. 1- Circuito indicativo de fontes térmicas de um cabo isolado enterrado.	26
Figura 2. 2 - Cabo OF típico (Oil Filled).	28
Figura 2. 3 - Cabo PIPE típico.	28
Figura 2. 4 - Cabo típico com isolamento extrudada em EPR.	28
Figura 2. 5 - Cabo com isolamento extrudada em XPLE.	29
Figura 2. 6 - Banco de dutos em backfill bimodal.	31
Figura 2. 7 - Instalação de dutos em MND – Método Não Destrutivo.	32
Figura 2. 8 - Gráfico Ampacidade versus Profundidade.	33
Figura 2. 9 - Gráfico Ampacidade versus Resistividade.	34
Figura 2. 10 – Potenciais termodinâmicos.	36
Figura 2. 11 - Modelo de cabo instalado diretamente no solo.	39
Figura 2. 12 - Secagem visível após teste de migração de umidade.	42
Figura 2. 13 - Pedra moída em duas granulometrias.	45
Figura 2. 14 - Backfill bimodal.	45
Figura 2. 15 – Curvas de compactação.	46
Figura 2. 16 - Resistividade do backfill bimodal versus teor de umidade.	46
Figura 2. 17 - Intervalo recomendado de granulometria para backfill.	47
Figura 2. 18 - Resistividade térmica das argamassas.	49
Figura 2. 19 - Friabilidade das argamassas.	49
Figura 2. 20 - Medição de resistividade à seco.	50
Figura 2. 21 – Domínios real e transformado em linhas de transmissão subterrâneas.	52
Figura 2. 22 - Resistividade térmica de vários solos em função do teor de umidade, com domínios úmido (A) e seco (B).	55
Figura 2. 23 - Faixa de temperaturas típicas para solos em condições quentes, por país.	60
Figura 2. 24 - Faixa de temperaturas típicas para solos em condições frias, por país.	60
Figura 2. 25 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos em estações quentes, por país.	62
Figura 2. 26 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos em estações frias, por país.	62
Figura 2. 27 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos ressecados, por país.	63

Figura 2. 28 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos úmidos, em torno de solos secos, por país.....	64
Figura 2. 29 - Isotermas críticas típicas para solos ressecados, por país.....	64
Figura 3. 1 - Assinatura ambiental: Parâmetros críticos.....	73
Figura 3. 2 - Granulometria Talbot para areias e rochas moídas.	76
Figura 3. 3 - Comportamento térmico do backfill fluidizado em laboratório.	77
Figura 3. 4 - Curva de resistividade térmica do backfill bimodal x tempo de secagem em estufa	78
Figura 3. 5 - Campos original e transformado típicos	79
Figura 4. 1 - Três cabos diretamente enterrados mapeados com simetria de eixo.	84
Figura 4. 2 - Fronteiras no domínio transformado.	85
Figura 4. 3 - Divisão geométrica em faixas " K_x ".....	87
Figura 4. 4 - Divisão geométrica das faixas em retângulos de largura " L_{xy} ".....	88
Figura 4. 5 - Domínios transformados complexo e numérico.	88
Figura 4. 6 - Modelagem da resistência térmica equivalente por analogia com associação de resistores.	90
Figura 4. 7 - Estados limite para resistividade térmica dos materiais.	91
Figura 4. 8 - Estados intermediários rotulados para resistividades térmicas entre estados seco e saturado.....	92
Figura 4. 9 - Variação de resistividade térmica equivalente para os rótulos adotados.	98
Figura 4. 10 - Sensibilidade da ampacidade à assinatura ambiental para bitolas diversas de condutor.	99
Figura 4. 11 - Variação de ampacidade para condutor de 1.000mm ² em função da assinatura ambiental.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Organizações versus utilização de normas IEC para dimensionamento de cabos.....	22
Tabela 2. 2 - Distribuição de pesquisados sobre metodologia de aquisição de dados de temperatura do solo, fundo do mar e túnel.	61
Tabela 2. 3 - Distribuição de pesquisados sobre metodologia de aquisição de dados de resistividade térmica do solo, fundo do mar e túnel.	63
Tabela 2. 4 - Distribuição de pesquisados sobre questões envolvendo secagem de solos e resistividade térmica.....	65
Tabela 2. 5 - Distribuição de pesquisados sobre falhas de origem térmica em cabos.....	67
Tabela 3. 1 - Requisitos de desempenho – Backfill fluidizado - Seattle City Light.....	75
Tabela 4. 1 - Rótulos aplicados a materiais utilizados com base na metodologia deste trabalho.	93
Tabela 4. 2 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para materiais rotulados como “seco”.	94
Tabela 4. 3 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para materiais rotulados como “parcialmente seco”.	95
Tabela 4. 4 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para materiais rotulados como “parcialmente úmido”.	95
Tabela 4. 5 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para backfill rotulado como “parcialmente seco” e demais materiais como “parcialmente úmido”.	96

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. QUESTÃO E HIPÓTESE DO TRABALHO.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1. NORMAS E METODOLOGIAS APLICADAS.....	22
2.2. INTERAÇÃO ENTRE CONDUTOR E MEIO AMBIENTE.....	24
2.3. COMPORTAMENTO TÉRMICO E MIGRAÇÃO DE UMIDADE DE SOLOS NATURAIS E DE BACKFILLS.....	38
2.4. MIGRAÇÃO DE UMIDADE.....	40
2.5. MATERIAIS DE ENTERRAMENTO DE CABOS – ESTADO DA ARTE BACKFILL NO BRASIL.....	42
2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SOLOS E ATERROS ESPECIAIS.....	51
2.7. SELEÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE DO SOLO.....	55
2.8. PRÁTICAS COLETADAS PELO CIGRE EM 2015.....	58
2.9. A ASSINATURA AMBIENTAL.....	67
3. MODELAGEM DA INTERAÇÃO ENTRE CABO E SOLO.....	70
3.1. A TERMODINÂMICA DO PROCESSO DE TRANSFÊRENCIA DE CALOR E MASSA EM UM MEIO POROSO.....	70
3.2. TERMODINÂMICA CLÁSSICA OU MECÂNICA DO MEIO CONTÍNUO.....	72
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO <i>BACKFILL</i> FLUIDIZADO.....	74
3.4. A TRANSFORMADA CONFORME.....	79
4. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA O CÁLCULO DA RESISTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE.....	82
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	82
4.2. SELEÇÃO DE VALORES DE RESISTIVIDADE DOS MATERIAIS – METODOLOGIA ALTERNATIVA.....	91

4.3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	94
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5. CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes anseios da sociedade é uma melhor qualidade de vida associada à confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Uma das formas de se atender a esse anseio é a maior utilização de linhas de transmissão e redes de distribuição subterrâneas em substituição às linhas e redes aéreas, já que o desempenho técnico das instalações subterrâneas em termos de continuidade de fornecimento é notadamente superior devido à baixa sujeição a interferências externas. Adicione-se a esta vantagem, aquela de infringir poluição visual mínima ao já tão saturado ambiente urbano.

A corrente máxima admissível nos condutores de uma linha de transmissão subterrânea depende da diferença de temperatura (salto térmico) entre o condutor e de um ponto remoto do solo onde os cabos estão instalados. Neste sentido, a resistência térmica externa do solo circundante ao cabo enterrado (*backfill*, material de reaterro e solo natural), cujas propriedades térmicas têm grande influência na determinação da capacidade de condução de corrente de uma determinada linha de transmissão (ALMEIDA, 2011) é de extrema relevância. Tal relação é melhor compreendida ao intuir que, por efeito Joule, o aumento da magnitude da corrente elétrica circulante por um condutor provoca neste uma determinada elevação de temperatura. Neste caso, a temperatura limite de operação de um condutor seria aquela que, aplicada a devida margem de segurança, coincidiria com a temperatura a partir da qual ocorreriam alterações físico-químicas deteriorantes e irreversíveis na estrutura molecular do dielétrico e das camadas que o circundam. Neste sentido, a corrente elétrica máxima no condutor seria aquela que provocaria tal elevação de temperatura, considerando fatores como a inércia térmica experimentada pelo condutor em interação com meio em que se encontra, curva de carregamento, fator de carga, entre outras variáveis relacionadas ao contexto operacional.

O conhecimento atual com relação às perdas por efeito Joule é suficiente para compreender e solucionar a maior parte dos problemas de engenharia, no entanto, o conhecimento da resistência térmica externa aos cabos de uma linha de transmissão subterrânea ainda apresenta aspectos não suficientemente

compreendidos (ALMEIDA, 2011), seja com relação aos materiais, seja com relação aos controles a serem dispendidos nas obras em campo (CIGRE, 2015).

Do ponto de vista termodinâmico, cada condutor de uma linha de transmissão subterrânea se comporta como uma fonte térmica filiforme de comprimento infinito, circundada por material dissipador em toda sua extensão. O calor se dissipa ao redor do cabo com a formação de isotermas, que variam com a resistência térmica oferecida pelo meio à dissipação do calor gerado pelo condutor.

Sob a perspectiva ambiental o cabo condutor enxerga o meio onde está enterrado como um grande (sumidouro – poço termodinâmico) de absorção onde o equilíbrio termodinâmico se faz com as variáveis de estado (P, T). Constituindo um sistema termodinâmico, haverá a incessante interação entre condutores e meio ambiente em busca do equilíbrio termodinâmico.

Ocorre, no entanto, que os custos de implantação de redes subterrâneas são elevados comparativamente aos das redes aéreas. Em situações de densa ocupação urbana em que ocorre a escassez de recursos imobiliários para instituição de faixas de segurança necessárias às redes aéreas, as redes subterrâneas podem figurar como única solução técnica e economicamente viável.

Os elementos de maior peso nesta composição de custos das linhas de transmissão subterrâneas são os condutores propriamente ditos, e as obras civis de implantação.

Ao passo que, no passado, as empresas utilizavam como material de reaterro da vala o mesmo material originado de sua escavação (FERREIRA, 1993), atualmente a vala na qual os cabos são instalados é preenchida com material termicamente estabilizado (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), denominado *backfill*.

Destaca-se que, no custo do cabo, a variável de maior impacto é a seção do condutor utilizado que se relaciona com a carga a ser atendida e com a resistividade térmica do material externo ao cabo (*backfill*, solo natural nas laterais da vala, material de reaterro sobre o *backfill*) no qual o cabo encontra-se instalado. Para o dimensionamento da seção do cabo são relevantes as variáveis: a carga a ser atendida, as características intrínsecas do cabo, e a resistividade térmica

equivalente do conjunto *backfill*, solo natural e material de reaterro. Esta última chamamos de “Assinatura Ambiental”.

No custo da obra civil as variáveis de maior impacto estão correlacionadas com as dimensões da vala, que depende da profundidade e do espaçamento entre os cabos. Dentre estes custos, aqueles devido a quantidade de material envolvido no *backfill*, no reaterro sobre o *backfill* e o tempo necessário à sua aplicação representam uma parcela significativa do custo total da obra.

Desta forma, um projeto econômico de uma linha de transmissão subterrânea deve necessariamente considerar:

- A. Emprego do condutor com seção mínima que possibilite o transporte da corrente máxima da linha levando em conta a dissipação de calor proporcionada pelo *backfill* /terreno que envolve a vala e sobre o *backfill* (reaterro).
- B. Usar materiais (*backfill*) de baixa resistividade e boa estabilidade térmica e com resistência mecânica adequada para envolver o banco de dutos. A utilização de um material para o envelopamento dos dutos com resistividade térmica menor do que a dos materiais atualmente empregados, pode reduzir a seção dos condutores dos cabos e conseqüentemente os custos das instalações subterrâneas. De fato, a seção mínima do condutor depende diretamente da resistividade térmica equivalente do conjunto (*backfill* / solo natural / reaterro), sendo que a resistividade térmica do *backfill* responde sozinha por cerca de 50% de todas as resistências térmicas envolvidas no cálculo da seção do condutor.
- C. Utilizar *backfill* de fácil aplicação que possa ser aplicado de forma mecanizada e sem necessidade de compactação convencional através de compactadores a percussão ou placas vibratórias, permitirão reduzir o prazo de execução das obras civis (RADHAKRISHNA, H. S., 1981) o que propiciará uma redução adicional dos custos totais das obras de rede subterrâneas.
- D. Sempre que possível, desvincular a obra civil da instalação e lançamento dos cabos, fazendo uso de banco de dutos, ação já realizada atualmente.

Destaca-se que o melhor *backfill* disponível comercialmente no Brasil atualmente é composto por materiais oriundos de rochas vulcânicas¹ que proporcionam resistividade térmica à seco da ordem de 1 K.m/W a seco (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). Destaca-se ainda que para este tipo de *backfill* ser utilizado como material de reaterro de cabos enterrados é necessário que essas rochas sejam convenientemente moídas com granulometrias pré-especificadas e misturadas entre si com teor específico de água e controle da sua compactação na vala envolvendo os dutos (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). Este processo depende de um rígido controle durante a sua execução, além do fato de que o *backfill* encontra-se no limite de sua resistividade térmica. Nos cálculos para determinação da resistividade térmica equivalente, o *backfill* representa cerca de 50% de todas as resistividades térmicas externas ao cabo. Visando contribuir significativamente para a solução desse problema é que a Enel Distribuição São Paulo iniciou no mês de outubro de 2017 um projeto de pesquisa e desenvolvimento² com a principal motivação de desenvolver de um novo material para envelopamento de dutos (novo *backfill*), de menor resistividade térmica, igual ou inferior a 0,75 K.m/W e de maior facilidade de aplicação (*backfill* fluidizado) comparativamente aos materiais disponíveis atualmente (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019).

Nesta análise, resta ainda a necessidade do controle dos materiais do terreno que envolvem o *backfill*, que respondem pelos outros 50% de todas as resistências térmicas envolvidas no cálculo da seção do condutor. Atualmente algumas empresas utilizam como reaterro do *backfill* os mesmos materiais retirados na ocasião da abertura da vala, enquanto outras utilizam rejeitos de pedreiras, considerando que os mesmos foram instalados adequadamente e que mantêm seu nível de resistividade térmica ao longo de toda a vida útil da instalação, o que não é necessariamente verdade.

¹ Exceção seja feita à dolomita, uma vez que esta rocha não se enquadra na definição de rocha vulcânica. Atualmente o *backfill* à base de dolomita não é explorado como solução técnica no Brasil.

² Projeto desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D – da ANEEL

O corte típico de uma vala de instalação de cabos subterrâneos pode ser observado na Figura 1.1.

Figura 1. 1 - Corte típico: banco de dutos de linha de transmissão subterrânea.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A contribuição objetivada por esta dissertação de mestrado é, principalmente, desenvolver e sistematizar metodologia alternativa para determinação dos valores de resistividade térmica equivalente do *backfill*, material de reaterro e do solo nativo que envolvem a vala (assinatura ambiental) e que são utilizados como dados de entrada para os cálculos de dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica.

A metodologia alternativa propõe considerar todos os materiais e suas respectivas características em torno do cabo como uma assinatura ambiental, trazendo como resultado valor mais assertivo de resistividade térmica de toda assinatura.

1.1. QUESTÃO E HIPÓTESE DO TRABALHO

Questão: É possível avançar no estado da arte de projetar linhas de transmissão subterrâneas utilizando-se ferramentas de mecânica estatística de forma a simplificar os cálculos e melhorar a assertividade na obtenção da resistividade térmica equivalente do meio ambiente que circunda o condutor?

Hipótese: As ferramentas baseadas em mecânica estatística se mostram como uma opção poderosa e tecnicamente viável do ponto de vista técnico, simplificando e otimizando sobremaneira a metodologia de determinação da resistividade térmica equivalente do meio ambiente que circunda o condutor.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o de desenvolver e apresentar metodologia alternativa para a determinação dos valores de resistividade térmica do *backfill* e do solo nativo que envolvem a vala a serem utilizados como dados de entrada para os cálculos de dimensionamento de cabos subterrâneos de transmissão de energia elétrica. Na fase de projeto de uma linha de transmissão subterrânea, a variável determinada pode trazer como benefício a possibilidade de redução de bitola dos condutores a serem aplicados, ao passo que na fase de operação pode possibilitar maior carregamento dos condutores com a mesma bitola aplicada.

Tem-se ainda os seguintes objetivos específicos:

- Estudar as variáveis envolvidas no projeto das linhas subterrâneas, visando a definição de parâmetros e conceitos que sirvam de base para a determinação dos valores de resistividade térmica do meio externo ao cabo;
- Avaliar e analisar metodologias atualmente utilizadas, tendo em vista a sua sistematização, considerando-se as características do *backfill* e do material de reaterro utilizado sobre a vala, e solo natural no entorno desta.
- Avaliar o teor ideal de umidade do material dentro da vala (*backfill*), material de reaterro e solo no entorno da vala e estabelecer o valor ótimo para adoção no cálculo da resistividade térmica equivalente do material de contorno.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está subdividida em cinco capítulos. No primeiro, faz-se uma introdução da temática do trabalho e são descritos os objetivos e sua estrutura.

O segundo capítulo descreve o estado da arte, abordando os materiais, normas, metodologia e práticas adotadas ao redor do mundo envolvendo projetos de linhas de transmissão subterrâneas.

No terceiro é descrita a modelagem da interação entre os condutores de uma linha de transmissão subterrânea do ponto de vista termodinâmico e o ambiente, partindo de uma abordagem baseada na mecânica do meio contínuo e chegando à abordagem através da mecânica estatística.

No quarto capítulo é apresentada metodologia para classificação térmica dos materiais que circundam o cabo da assinatura ambiental com base nos estados a seco e saturado com água, conforme a curva de resistividade térmica versus teor de umidade de cada material. Também são apresentados exemplos de aplicação da metodologia, análises quantitativas, resultados obtidos e discussões.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões, as contribuições da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizada uma breve explanação sobre o estado da arte do projeto de linhas de transmissão de energia elétrica subterrâneas, enfatizando os aspectos relacionados ao emprego das variáveis relacionadas à interação dos cabos com o meio ambiente, aqui representados pelos *backfill's*, solos naturais e materiais de reaterro.

As questões relacionadas à interação entre cabo e solo com os entendimentos de (VRIES, 1958), (BRACKELMANN, 1984), (DONNAZZI, OCCHINI e SEPPI, 1979), (BARTOLI, 1986), (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), (HUSSAIN, 1997), bem como a determinação da resistividade térmica equivalente através da metodologia da Transformada Conforme proposta por (GAZZANA e PRIARROGGIA, 1964) e (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972) serão mais profundamente estudadas no capítulo 3.

2.1. NORMAS E METODOLOGIAS APLICADAS

No ano de 2015, levantamento realizado pelo CIGRE³ apontou que, embora alguns países (a exemplo de Alemanha e Japão) possuam normas próprias, ou ainda, utilizem-se de normas do IEEE⁴, as normas relacionadas ao dimensionamento de cabos elétricos mais referenciadas internacionalmente são as da série IEC⁵ (CIGRE, 2015).

Tabela 2. 1 - Organizações versus utilização de normas IEC para dimensionamento de cabos.

Tipo de empresa	Resultados					
	Sempre	Frequentemente	Ocasionalmente	Raramente	Nunca	Outros
Fabricante de cabos	13	6	1		1	
Empresa de consultoria	7	6				
Utilidades públicas	14	27	9	2	5	2
Outros (específicos)	5	1	1			1
Total geral	39	40	11	2	6	3
Nota: Referências a softwares comerciais de dimensionamento são consideradas como método não-padronizado IEC por alguns dos respondentes à pesquisa.						

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

³ CIGRE: Conseil International des Grands Réseaux Électriques; Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos.

⁴ IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers; Instituto dos Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas.

⁵ IEC: International Electrotechnical Commission; Comissão Internacional de Eletrotécnica.

Das 101 entidades consultadas ao redor do mundo demonstradas na Tabela 2.1, apenas 6 declararam nunca utilizar metodologias ou referências preconizadas pela IEC.

A norma IEC 60287 - Electric cables – Calculation of the current rating (IEC, 2014) é a que teria a maior abrangência e aplicação, e é dividida em partes e seções, como segue:

- IEC 60287-1: Rating equations (100 % load factor) and calculation of losses (equações de dimensionamento e cálculos de perdas, com fator de carga de 100%)

- IEC 60287-1-1: General.

Generalidades sobre as equações de dimensionamento e cálculos de perdas, com fator de carga 100%

- IEC 60287-1-2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation.

Apresenta metodologias e equações de cálculo dos fatores de perda por correntes parasitas na bainha para dois circuitos em formação plana;

- IEC 60287-1-3: Current sharing between parallel single-core cables and calculation of circulating current losses.

Compartilhamento de correntes entre cabos paralelos de núcleo único e cálculo de perdas por corrente circulante

- IEC 60287-2: Thermal resistance – (Resistência térmica)
 - IEC 60287-2-1: Calculation of thermal resistance.
 - Metodologia e equações para cálculo de resistência térmica
 - IEC 60287-2-2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation.
 - Uma metodologia para determinação do fator de agrupamento de cabos instalados ao ar, protegidos da radiação solar.
- IEC 60287-3-1: Operating conditions – (Condições de Operação)

- IEC 60287-3-1: Site reference conditions.
Condições de referência do local de instalação
- IEC 60287-3-2: Economic optimization of power cable size.
Otimização econômica do dimensionamento de cabos de potência
- IEC 60287-3-3: Cables crossing external heat sources.
Cabos em cruzamento com fontes externas de calor

Entre as entidades internacionais que se dedicam ao assunto em pauta, pode-se citar o CIGRE, que possui vários grupos de estudos, dentre os quais aqueles relacionados aos sistemas subterrâneos de transmissão de energia elétrica.

Ainda dentro da série IEC, deve ser considerada a norma IEC-60853, que define parâmetros e condições para os cálculos de dimensionamento de corrente em regimes cíclico e emergencial dos cabos (IEC, 2008).

2.2. INTERAÇÃO ENTRE CONDUTOR E MEIO AMBIENTE

A publicação (IEC, 2014) define que a elevação de temperatura no condutor elétrico responde à equação 2.1:

$$\Delta\theta = (I^2R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \quad (2.1)$$

Sendo:

- $\Delta\theta$: Elevação de temperatura do condutor acima da temperatura ambiente (K)
- I : Corrente circulante em um condutor (A)
- R : Resistência em corrente alternada por unidade de comprimento do condutor sob temperatura máxima de operação (Ω / m)
- W_d : Perda dielétrica por unidade de comprimento para a isolação em torno do condutor (W/m)
- T_1 : Resistência térmica por unidade de comprimento entre um condutor e a blindagem (K.m/W)
- T_2 : Resistência térmica por unidade de comprimento da camada entre a blindagem e a armadura (K.m/W)

- T_3 : Resistência térmica por unidade de comprimento da capa externa do cabo (K.m/W)
- T_4 : Resistência térmica média por unidade de comprimento entre a superfície externa do cabo e o meio ambiente circundante (K.m/W)
- n : Número de condutores carregados no cabo, de igual bitola e carregamento
- λ_1 : Fator de perda da blindagem (razão entre as perdas totais nas blindagens e as perdas totais de condutores, ou razão de perdas em uma blindagem para as perdas em um condutor)
- λ_2 : Fator de perda de armadura (razão entre as perdas totais na armadura e as perdas totais de condutores, ou proporção de perdas em uma armadura para as perdas em um condutor)

A maioria dos métodos de dimensionamento pressupõe que o solo tem propriedades uniformes fora da vala, mas nem sempre é esse o caso. Outros métodos analíticos ou análise de elementos finitos podem ser necessários onde o solo não pode ser considerado como tendo características térmicas uniformes.

De acordo com a norma da IEC 60287 (IEC, 2014), o dimensionamento dos condutores dos cabos isolados é feito utilizando uma analogia do sistema de transferência de calor com um circuito elétrico resistivo, considerando um cabo isolado singelo diretamente enterrado, em regime permanente, onde as temperaturas dos diversos pontos não sofrem variações com o tempo.

Neste circuito, mostrado na Figura 2.1, as fontes de calor são associadas a fontes de corrente; as resistências térmicas, através das quais o calor flui, são representadas por resistências elétricas; e as temperaturas nos diversos pontos do cabo e do ambiente são representadas pelas tensões elétricas no circuito.

Figura 2. 1- Circuito indicativo de fontes térmicas de um cabo isolado enterrado.

Fonte: (CIGRE, 2015).

No circuito:

T_1 = resistência térmica da isolação

T_2 = resistência térmica do material de preenchimento entre a blindagem metálica e a armação do cabo

T_3 = resistência térmica da capa externa

T_4 = resistência térmica do solo entre a capa externa e o meio ambiente

θ_c = temperatura no condutor

θ_s = temperatura na blindagem metálica

θ_a = temperatura na armadura

θ_j = temperatura na capa externa do cabo

θ_e = temperatura no meio ambiente

W_c = calor gerado no condutor

W_d = calor gerado na isolação

W_s = calor gerado na blindagem metálica

W_a = calor gerado na armadura

O calor no condutor do cabo é gerado pelas perdas Joule e pode ser expresso pela equação 2.2:

$$W_c = R_{ac} \cdot I^2 \quad (2.2)$$

onde:

R_{ac} = resistência elétrica do condutor em corrente alternada na temperatura de cálculo

I = corrente elétrica circulando pelo cabo

Resolvendo o circuito elétrico, a corrente elétrica no condutor do cabo pode ser

expressa pela Equação 2.3, de acordo com a IEC 60287.

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_e) - W_d(0,5T_1 + T_2 + T_3 + T_4)}{R_{ca}^{max}[T_1 + (1 + \lambda_1)T_2(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (2.3)$$

Para a determinação dos parâmetros da fórmula são seguidas as etapas:

- ✓ Caracterização dos detalhes construtivos dos cabos;
- ✓ Coleta dos dados da instalação dos cabos.

A caracterização dos cabos pode ser feita através dos relatórios de testes dos cabos, dados de fabricação ou padrões de cabos de fabricantes.

A Enel Distribuição São Paulo faz esta caracterização através dos dados de fabricação e utiliza em seu sistema os cabos típicos representados nas Figuras 2.2 a 2.5, na classe de tensão de 138kV, com bitolas variando de 400mm² a 2.000mm², conforme a necessidade do projeto. Ressalta-se que, nesta concessionária, atualmente são instalados somente cabos com isolamento extrudada em XLPE⁶. Os demais tipos de cabos foram instalados até o final da década de 1990.

⁶ XLPE: Composto termofixo à base de polietileno reticulado

Figura 2. 2 - Cabo OF típico (Oil Filled⁷).

Fonte: (CIGRE, 2015).

Figura 2. 3 - Cabo PIPE típico.

Fonte: (CIGRE, 2015).

Figura 2. 4 - Cabo típico com isolamento extrudada em EPR⁸.

⁷ Cabo tipo OF (Oil filled), com isolamento em papel impregnado com óleo isolante

⁸ EPR: Borracha de etileno propileno

Fonte: (CIGRE, 2015).

Figura 2. 5 - Cabo com isolamento extrudada em XPLE.

Fonte: (CIGRE, 2015).

As características dos cabos relevantes para o cálculo da ampacidade⁹ no dimensionamento do condutor são:

a) Tipo da isolamento do cabo: OF, EPR, XLPE;

⁹ Ampacidade: Termo comumente utilizado para designar a capacidade de condução de corrente de uma linha de transmissão

- b) Tipo do condutor: cobre ou alumínio;
- c) Diâmetro externo do condutor;
- d) Seção transversal do condutor;
- e) Resistência elétrica em corrente contínua a 20° C;
- f) Diâmetro externo da isolação;
- g) Espessura da isolação;
- h) Material da isolação: papel impregnado, XLPE, EPR;
- i) Tipo da blindagem metálica: fios de cobre ou alumínio, alumínio corrugado, fitas de cobre ou alumínio, chumbo extrudado, etc.;
- j) Espessura da blindagem metálica;
- k) Diâmetro externo da blindagem metálica;
- l) Tipo de armadura: fios de aço;
- m) Tipo de acolchoamento;
- n) Espessura do acolchoamento;
- o) Material da capa externa: polietileno de alta densidade;
- p) Espessura da capa externa;
- q) Diâmetro externo do cabo;

Os dados da instalação dos cabos necessários para o cálculo são:

- a) tipo de instalação: diretamente enterrada, banco de dutos, ar livre, túnel e galeria;
- b) profundidade da instalação;
- c) dimensões do banco de duto;
- d) material de revestimento dos cabos e dos dutos: concreto, argamassa, *backfill* selecionado;
- e) distância entre os cabos;
- f) distância entre os circuitos;
- g) resistividade térmica do revestimento dos cabos e/ou dutos;
- h) resistividade térmica do solo nativo;
- i) temperatura do solo;
- j) temperatura do ambiente;
- k) existência de outras fontes de calor nas proximidades: outros cabos enterrados;
- l) existência de pontos frios: refrigeração dos cabos.

Em suas construções mais recentes, a concessionária Enel Distribuição São Paulo tem utilizado, predominantemente, dois tipos de instalação ao longo das linhas de transmissão. O primeiro é a que considera a construção de banco de dutos corrugados de polietileno, instalados em valas a céu aberto, revestidos com *backfill* do tipo “bimodal”, ou seja, composto basicamente por granito moído com granulometria composta por elementos finos e grossos em duas modalidades bem definidas (ver Figura 2.18). O segundo utiliza-se de dutos inseridos diretamente no solo através de método não destrutivo por perfuração horizontal direcional - MND¹⁰ (método não destrutivo). Em ambos os casos, os vazios entre os cabos e as paredes internas dos dutos são preenchidos com bentonita. As figuras 2.6 e 2.7 ilustram estes dois tipos de instalação.

Figura 2. 6 - Banco de dutos em backfill bimodal.

Fonte: (ENEL, 2017).

¹⁰ MND: Método não destrutivo. Sigla comumente atribuída ao sistema de instalação através de perfuração horizontal direcional do solo

Figura 2. 7 - Instalação de dutos em MND – Método Não Destrutivo.

Fonte: (ENEL, 2017).

No cálculo da capacidade de corrente, a variável de maior importância é a resistência térmica do material que envolve os cabos. Esta variável representa entre 50% e 75% da resistência total entre o condutor e o ambiente (CIGRE, 2015).

A importância da resistividade do solo e do material que compõe o *backfill* que envolve os dutos do banco foi demonstrada em artigo técnico publicado no SNPTEE¹¹ (LOPES e NARIMATSU, 1986), assim como nos trabalhos de (MITCHELL, KAO e ABDEL-HADI, 1977), (FERREIRA, 1993), (FREITAS, 1995), (ALMEIDA, 2017), (BARTOLI e ALMEIDA, 1987).

A resistência térmica entre a capa externa do cabo e o ambiente em cabos enterrados “é influenciada diretamente pela profundidade da instalação do cabo e pela resistividade térmica do terreno circunvizinho” (LOPES e NARIMATSU, 1986).

“Pela expressão da resistência T_4 - que corresponde a resistência térmica externa ao cabo - para um único cabo enterrado é de se esperar que a resistividade tenha um papel preponderante na ampacidade” (LOPES e NARIMATSU, 1986). A expressão da resistência T_4 é mostrada na Equação 2.4.

$$T_4 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \ln \frac{4 \cdot L}{D} \quad (2.4)$$

¹¹ SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

onde:

ρ = resistividade térmica do solo

L = profundidade de instalação do cabo

D = diâmetro externo do cabo

As características do solo variam ao longo do percurso e com a profundidade, especialmente com o tipo de solo e condições do lençol freático. É geralmente reconhecido que o calor que emana do cabo se afasta dos cabos para a superfície da Terra, pelo que as variações nos estratos do solo também podem influenciar a transferência de calor. A transferência de calor em meios porosos foi amplamente estudada por Daniel de Vries (VRIES, 1958) com o objetivo inicial de fomentar a agricultura na Europa.

De acordo com (LOPES e NARIMATSU, 1986) o incremento da ampacidade provocado pelo decréscimo na profundidade da instalação é de pequena monta, embora significativo. Profundidades variando entre 1,5 m e 3,0 m são muito comuns nas linhas existentes. A Figura 2.8, de (LOPES e NARIMATSU, 1986) apresenta a variação da ampacidade com a profundidade da instalação dos cabos.

Figura 2. 8 - Gráfico Ampacidade versus Profundidade.

Fonte: (LOPES e NARIMATSU, 1986), adaptado.

Ainda de acordo com (LOPES e NARIMATSU, 1986) “a resistividade térmica equivalente do conjunto terreno / reaterro / *backfill* é a variável de maior importância na resistência T_4 , e, portanto, na ampacidade” conforme pode ser observado na Figura 2.9.

Figura 2. 9 - Gráfico Ampacidade versus Resistividade.

Fonte: (LOPES e NARIMATSU, 1986), adaptado.

Segundo (LOPES e NARIMATSU, 1986) os cabos empregados na grande maioria das linhas de transmissão são singelos e sem armadura o que significa dizer que:

$$n=1, \lambda_2=0 \text{ e } T_2=0.$$

E ainda, considerando que as perdas no dielétrico são pequenas em relação às demais, a Equação 2.1 pode ser reescrita como a Equação 2.5, em função da corrente máxima admissível através da aproximação a seguir, que ainda que relativamente grosseira é conservadora e útil para o que se deseja demonstrar:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R[T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)]}} \quad (2.5)$$

T_4 representa entre 50 e 75% da resistência entre a fonte térmica (condutor) e um ponto remoto do solo no meio ambiente, sendo, portanto, um dos parâmetros mais importantes e também menos compreendidos (CIGRE, 2015). É o único parâmetro externo ao cabo que possibilita alterações, enquanto que os componentes cujas resistências são T_1 e T_3 , por serem internos e possuírem outras funções de maior importância que a de simples trocador de calor (proporcionar nível de isolamento adequado, proteger contra corrosão, entre outras) não permitem esta mesma facilidade (LOPES e NARIMATSU, 1986).

Importante considerar que, cabos em dutos completamente preenchidos com um material bombeável com resistividade térmica que não exceda a do solo circundante, seja no estado seco ou quando selado para preservar o teor de umidade do material de enchimento, podem ser tratados para efeitos da determinação de T_4 como cabos diretamente enterrados (IEC 60287-2-1, Chapter 4.2.7.1). Neste caso, é considerada a injeção de lama bentonítica como material de preenchimento entre os cabos e dutos, o que permite o enquadramento do estudo no item 4.2.7.1 da IEC 60287-2-1 e considerar, para efeito de cálculos, o conjunto cabo-duto como simplesmente cabo, sendo aplicável a Equação 2.6.

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.6)$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (2.7)$$

L : Distância da superfície do solo ao eixo dos cabos (mm);

D_e : Diâmetro externo de um cabo (mm);

S_1 : Distância entre eixos de dois cabos adjacentes (mm);

ρ_T : Resistividade térmica do solo (K.m/W).

Segundo (ALMEIDA, 2017), do ponto de vista termodinâmico, o condutor de um cabo isolado para alta tensão diretamente enterrado, é em um modelo de mecânica estatística, um Ensemble Canônico¹², ou seja, o cabo é um sistema no sentido de Gibbs, imerso em um reservatório (poço termodinâmico) infinito que tem as funções de estado $\{P \text{ e } T\}$ flutuando de modo estável (em equilíbrio). Nesta condição, o ensemble (sistema) troca calor com o reservatório, mas não troca massa.

As energias dos sistemas mecânicos universais podem ser resumidas no diagrama da figura a seguir:

Figura 2. 10 – Potenciais termodinâmicos

Fonte: (STOWE, 2007), adaptado.

As equações de equilíbrio de energia em todos sistemas universais permitem as 12 diferenciações de MAXWELL que guiam todas experiências dos sistemas

¹² Ensemble canônico, em mecânica estatística, é um ensemble estatístico que modeliza um sistema físico em contato com um reservatório térmico de temperatura fixa, supondo que o volume e o número de partículas do sistema também são fixos.

reais. As formas diferenciais nos sistemas reais podem ser obtidas diretamente dos potenciais termodinâmicos anteriores, e:

$$\partial E = T\partial S - p\partial V + \mu\partial N \text{ com variáveis independentes } (S, V, N) \quad (2.8)$$

$$\partial F = -S\partial T - p\partial V + \mu\partial N \text{ com variáveis independentes } (T, V, N) \quad (2.9)$$

$$\partial H = T\partial S + V\partial p + \mu\partial N \text{ com variáveis independentes } (S, p, N) \quad (2.10)$$

$$\partial G = -S\partial T + V\partial p + \mu\partial N \text{ com variáveis independentes } (T, p, N) \quad (2.11)$$

A diferencial de Gibbs apresenta um papel de suprema importância neste trabalho, pois permite o uso do ensemble canônico no comportamento dos cabos no solo. O cabo com a corrente circulante é o ensemble canônico e o meio é o reservatório de $\{p, T\}$.

$$\partial G - \mu\partial N = V\partial p - S\partial T \quad (2.12)$$

As equações 2.13 a 2.15 são as equações (M10 a M12) de Maxwell, deduzidas da energia livre de Gibbs são para $G(T, p, N)$:

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,N} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,N} \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial N}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_{T,N} \quad (2.14)$$

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial N}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_{p,N} \quad (2.15)$$

A equação 2.16 é aquela que governa o equilíbrio do *backfill* em torno ao cabo diretamente enterrado.

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,N} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,N} \quad (2.16)$$

2.3. COMPORTAMENTO TÉRMICO E MIGRAÇÃO DE UMIDADE DE SOLOS NATURAIS E DE BACKFILLS

Como já dito, as resistividades térmicas do solo e do *backfill* são os parâmetros de caracterização mais importantes de uma trincheira de cabo e têm efeitos decisivos no dimensionamento destes. Em muitos locais, esses parâmetros permanecerão relativamente constantes, mas em determinados locais podem sofrer mudanças significativas a curto e a longo prazo. A variação sazonal da umidade, da profundidade do lençol freático e mudanças no ambiente do cabo a longo prazo podem alterar as condições de umidade ambiente (e, portanto, as resistividades térmicas) em torno de um cabo. Outro fator importante é a possível formação de zonas secas em torno de cabos de energia subterrâneos devido ao fluxo de calor oriundo das perdas no cabo e os consequentes gradientes térmicos e de umidade.

A migração da umidade refere-se, portanto, a um movimento de umidade do líquido em um meio poroso longe de uma fonte de calor quando um conjunto de condições críticas são excedidas. As superfícies quentes tendem a se secar e o vapor de água tende a condensar em superfícies mais frias. O calor tende a fluir de quente para frio e a água tende a migrar do úmido para o seco.

Qualitativamente, então, é relativamente simples inferir que, em um meio poroso como um *backfill* de cabo subterrâneo, o calor fluirá para longe de uma fonte de calor (sob a forma de condução de calor em sólidos, convecção e condução em líquidos e convecção, radiação e condução em gases). O vapor de umidade irá se transferir de um ponto de aquecimento para uma superfície mais fria, e a água líquida tende a fluir de volta para a região mais seca. Enquanto os transportes de vapor e líquidos externos forem equilibrados pelo transporte hidráulico de retorno (líquido), a resistividade térmica líquida (resistência à transferência de calor) permanece aproximadamente constante. Se esses processos estiverem em equilíbrio, podemos dizer que o meio é termicamente estável. No entanto, quando a transferência externa de umidade domina, as pontes de umidade capilar entre as partículas do *backfill* se reduzem e eventualmente desaparecem. A ruptura nessas

pontes capilares (térmicas) corresponde a uma série de condições críticas: teor crítico de umidade, aumento crítico da temperatura ou gradiente e fluxo de calor crítico. O processo foi discutido em muitas das referências, a Seção 2 da Brochura Técnica (CIGRE, 2015), em particular, fornece uma visão abrangente dos fenômenos e sua modelagem. O tema também foi amplamente estudado em diversos trabalhos, entre eles os de (FREITAS, 1995), (BARTOLI, 1986), e (FERREIRA, 1993), além dos estudos fundamentais de (VRIES, 1958).

Para uma determinada condição do solo (densidade, teor de umidade e porosidade), a magnitude do gradiente de temperatura induz outras mudanças, como pressão de vapor (correspondente a gradientes de temperatura) e pressão hidráulica (correspondente a gradientes de conteúdo de umidade). Estes, por sua vez, irão influenciar a migração de umidade.

No item 2.2 foi apresentada a equação 2.16, que governa a transferência de calor e massa do *backfill* em torno do cabo.

Na figura 2.10 um cabo é instalado diretamente enterrado do solo, considerado num meio infinito no sentido de GIBBS (ALMEIDA, 2011).

Figura 2. 11 - Modelo de cabo instalado diretamente no solo.

Fonte: (ALMEIDA, 2011).

À medida que o cabo começa a aquecer por efeito da dissipação de calor oriunda da corrente circulante no cabo (efeito Joule), o material *backfill* que rodeia este cabo, que é constituído de: sólidos, vazios e umidade (água), tem a pressão parcial de vapor da água contida em torno ao cabo aumentada.

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,N} \quad \text{A entropia dentro do elemento de volume diminui.}$$

Por outro lado a entropia fora do elemento de volume aumenta de modo a compensar o efeito interno no elemento de volume. Segundo a termodinâmica, em um sistema em expansão, por aumento da pressão parcial de vapor, a temperatura diminui dentro do elemento de volume.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,N} \quad \text{O salto térmico aumenta no elemento de volume.}$$

No entanto, a entropia externa tende a compensar este processo, formando assim o equilíbrio termodinâmico flutuante de temperatura crítica e grau de saturação crítico do processo.

O entendimento de grau de saturação crítico é creditado a (DONNAZZI, OCCHINI e SEPPI, 1979) enquanto que o entendimento de temperatura crítica é creditado a (BRACKELMANN, 1984). Os parâmetros críticos serão melhor abordados no item 3.2.

2.4. MIGRAÇÃO DE UMIDADE

O modelo Philip / de Vries (modelo PdV) (PHILIP e VRIES, 1957) é a descrição física mais geralmente aceita dos processos complexos que constituem transferência de calor e umidade. O modelo PdV descreve o transporte de água, vapor de água e calor como funções dos gradientes de temperatura e de umidade e da gravidade, dependendo de alguns parâmetros externos, por exemplo, a distância até o nível das águas subterrâneas. As equações diferenciais parciais não-lineares decorrentes são regidas por um conjunto de 5 coeficientes de difusão, que podem variar em várias ordens de grandeza em relação ao teor de temperatura e umidade. Os trabalhos de (KEMA e HEIDEMIJ, 1981) demoraram alguns anos e realizaram um extenso trabalho experimental para avaliar esses parâmetros para apenas três tipos de solo arenosos. Note-se que, em colaboração, (KEMA e

HEIDEMIJ, 1981) realizaram um estudo teórico e anos de extensa pesquisa experimental sobre o tema da migração de calor e umidade em torno dos cabos de energia. O estudo abrange os resultados do mecanismo físico que levará a uma zona seca em torno do cabo de energia em solo arenoso. As experiências tanto no laboratório como no campo mostraram que existe uma relação entre as propriedades da areia (capacidade de retenção) e as condições críticas em que começa a secagem da areia ao redor do cabo de potência. O início da secagem depende principalmente de quatro fatores, ou seja, o fluxo de calor gerado pelo cabo de alimentação e a temperatura da bainha do cabo também são importantes, assim como as propriedades do solo, como a densidade a seco e o teor de umidade.

Como mencionado, as equações que modelam os processos descritos acima, geralmente Philips e De Vries (PHILIP e VRIES, 1957), são complexas e possuem uma série de coeficientes de difusividade que são difíceis de obter, embora essas equações tenham sido implementadas, seja de forma analítica, forma dimensional ou em um solucionador MEF (método dos elementos finitos). O modelo de duas zonas pressupõe que o *backfill* ou o solo dentro de uma distância crítica, geralmente relacionado a uma isoterma crítica, é seco e externo.

(BRACKELMANN, 1984) e (PILGRIM, SWAFFIELD, *et al.*, 2011) demonstraram de forma independente que, em algumas condições, e essas são as condições que preocupam as instalações de cabos subterrâneos em situações adversas, a modelagem de duas zonas é uma boa aproximação da realidade mais complexa. De fato, muitos engenheiros que fizeram testes de sondas térmicas notaram um anel seco ao redor da sonda ao executar testes prolongados em altas potências, como, por exemplo, a Figura 2.12, que mostra uma configuração de sonda que utiliza isolamento final (que cobre normalmente a superfície transparente) de forma a evitar o fluxo de calor longitudinal. As amostras de teste foram cortadas longitudinalmente em a) e b), e o isolamento final foi removido para revelar esse fenômeno após um teste de laboratório em c).

Figura 2. 12 - Secagem visível após teste de migração de umidade.

Fonte: (CIGRE, 2017), adaptado.

Tal discussão é bem abordada nas publicações de (BARTOLI, 1986) e (BARTOLI e ALMEIDA, 1987).

2.5. MATERIAIS DE ENTERRAMENTO DE CABOS – ESTADO DA ARTE BACKFILL NO BRASIL

Considerações Técnicas Sobre Uso de *backfill*

Nesta seção serão apresentadas algumas considerações sobre os métodos de cálculo para avaliação da máxima corrente que se pode aplicar no dimensionamento de cabos subterrâneos diretamente enterrados em solos não uniformes e sujeitos à migração de umidade, bem como o papel do *backfill* nestas instalações.

Tradicionalmente o problema é tratado através da modalidade de um processo de condução que em regime estacionário apresenta apenas resistências térmicas. Porém, como já dito, o meio circunstante aos cabos é poroso e sua resistência térmica é altamente dependente da quantidade de umidade que existe no meio, devendo ser considerado o fenômeno de migração de umidade ocasionado pelo aquecimento do material ao redor dos cabos. Em circunstâncias especiais este meio poroso pode secar (DONNAZZI, OCCHINI e SEPPI, 1979), (KEMA e HEIDEMIJ, 1981), (RADHAKRISHNA, H. S., 1981), (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), (FERREIRA, 1993), (FREITAS, 1995), (ALMEIDA, 2011) elevando em demasia a temperatura dos cabos que por sua vez provoca uma secagem mais intensa do meio e este mecanismo pode levar a instabilidade térmica

e falha dos cabos. Existem alguns modos de resolver o problema dependendo do nível de informação que se possui do solo. Serão apresentados a seguir alguns métodos contemplados por normas internacionais. O primeiro método considera que o solo possui uma caracterização térmica que possibilite afirmar que existirá um equilíbrio termo hidrológico em alguma fronteira em torno do cabo, a partir da qual calcula-se a corrente máxima admissível nos cabos para aquelas condições de instalação.

Em situações onde haja dificuldade ou impossibilidade de determinar a resistividade térmica do solo, o método CIGRE4 (CIGRE, 1986) apresenta-se como alternativa, no entanto, dado o nível de incerteza, os riscos do desconhecimento da realidade são convertidos em margens de segurança, tornando o método bastante conservativo.

A solução encontrada para mitigar o problema foi à criação de um material especial de reaterro (*backfill*) para substituir o solo (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) em torno dos cabos, região onde havia maior interferência das fontes térmicas nos parâmetros de condução de calor do solo (BARTOLI, 1986). Mais recentemente tem-se observado que, em determinadas condições, a umidade do solo migra frente à ação do campo térmico, devido às fontes térmicas (cabos) neles colocadas. Por isso, outras medidas especiais, sejam em materiais e/ou, sejam em projetos, foram desenvolvidas em todo o mundo para solucionar o problema da instabilidade termo-hidrológica. Nas próximas seções estão apresentadas as ferramentas mais utilizadas, em todo o mundo (CIGRE, 2015), desde a condição de falta de informação sobre o solo, até o estado de conhecermos informações e modelos que permitam dimensionar a capacidade de condução de corrente de um cabo diretamente enterrado, com a margem de risco dentro dos valores aceitos pela engenharia.

Considerações sobre os tipos e características dos *backfill*'s utilizados e testados no Brasil

Esta seção apresenta o estado da arte em materiais para recobrimento de cabos diretamente enterrados com ênfase em materiais até então utilizados no Brasil. No passado o preenchimento da vala era realizado com o próprio material originado da escavação (FERREIRA, 1993). Neste sentido, os solos naturais para

reaterro e preenchimento da vala (*backfill*) com resistividade a seco podem chegar a valores de resistividade térmica da ordem de 2,8 K.m/W. Para as chamadas areias selecionadas pode-se obter o valor de 1,0 K.m/W, e ainda o valor de 1,2 K.m/W para as misturas conhecidas como concreto magro. As vantagens e desvantagens de cada caso são objeto de discussão há décadas. O valor de 2,8 K.m/W é extremamente alto, uma vez que requer aumento expressivo na bitola dos condutores, podendo inviabilizar projetos, enquanto que, os chamados concretos magros oferecem dificuldade de remoção (baixa friabilidade¹³ do *backfill*), em ocasiões em que seja necessária algum tipo de intervenção na linha (ALMEIDA, 2011).

Os materiais artificiais, como solução para cobertura dos cabos na vala (*backfill*), tem se apresentado com viabilidade técnica e econômica muito interessantes são materiais disponíveis no mercado brasileiro também de fácil obtenção. O material de *backfill* que mais tem se aproximado da condição ótima (abundância na natureza, facilidade preparação, alta densidade de compactação) são as pedras moídas. Muito parecidas com as britas usadas na construção civil, a pedra moída é um material que exige pouco de processamento para seu uso (BARTOLI e ALMEIDA, 1987).

Na Figura 2.13, é apresentado o material da forma que ele é encontrado nas usinas de moagem de materiais para construção civil. Este é o chamado *backfill* bimodal, uma mistura de duas granulometrias (60% de grossos e 40% de finos da pedra moída), controlados no sistema de moagem com peneiras que fornecem grãos com duas distribuições granulométricas (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). Atualmente sua composição é de domínio público e vastamente utilizado por projetistas e construtores de linhas de transmissão subterrânea no Brasil. Na Figura 2.14, são apresentadas a título ilustrativo essas duas distribuições granulométricas.

¹³ Friabilidade: Característica que indica capacidade de material de se esboroar ou romper com facilidade, esfarelar. Para o *backfill*, refere-se à facilidade de escavação e remoção do material pós-aplicação na vala.

Figura 2. 13 - Pedra moída em duas granulometrias

Fonte: (ALMEIDA, 2017).

Figura 2. 14 - Backfill bimodal

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

A utilização deste material como *backfill*, requer sua aplicação em torno dos cabos, e compactação a 95% da densidade máxima (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). A Figura 2.15 ilustra a variação da densidade do material em função do teor de umidade.

Figura 2. 15 – Curvas de compactação

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

A resistividade térmica do solo, que pode ser medida com a utilização de sonda agiforme, tem relação com o teor (%) de umidade no solo compactado (ALMEIDA, 2011). Na Figura 2.16, é mostrada a dependência da resistividade térmica do *backfill* bimodal em função do teor de umidade.

Figura 2. 16 - Resistividade do *backfill* bimodal versus teor de umidade.

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

Backfill's Estabilizados

Para que um *backfill* seja considerado estabilizado, sua resistividade térmica a seco deve estar dentro do intervalo $0,8 \leq \rho_{s \text{ estável}} \leq 1,2$ [K.m/W] (ALMEIDA, 2011). Materiais que ofereçam estes valores de resistividade térmica não são comumente encontrados na natureza, portanto soluções artificiais com materiais termo-hidrologicamente estáveis são consideradas. Entre estas estão as areias selecionadas, as argamassas fracas (Weak Mix) de areia, cimento e água e as misturas mecânicas de pedra moída em duas MODAS (material bimodal). Pode ainda, ser considerada a possibilidade das misturas mecânicas com substituição da água por outro aditivo, tal como as emulsões de parafina e látex polimérico, que não estão sujeitas à migração de fase líquida viscosa (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). Esta última solução deveria enfrentar o fato de ser contrária às boas práticas ambientais, além do risco de certos materiais serem atacados e consumidos por micro-organismos (ALMEIDA, 2011).

A granulometria recomendada para o *backfill* bimodal é apresentada na Figura 2.17.

Figura 2. 17 - Intervalo recomendado de granulometria para backfill.

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

As curvas dos limites inferior e superior, representam as distribuições mínima e máxima para grãos finos e grossos, respectivamente. Já a curva bimodal é a representação da mistura das modas que compõem o backfill bimodal. No passado brasileiro, a utilização de areia de leitos de rios deixou claro que esta não possuía os finos e nem atendia a fronteira dos grossos no limite, o comumente levava os projetistas a utilizarem a argamassa CBS (cement bound sand) ou concreto magro aumentando cerca de 30% o valor da resistividade térmica externa do material (1,2 K.m/W) (ALMEIDA, 2011).

Argamassa CBS – Concreto Magro

Este material é construído com uma mistura mecânica (manual ou em betoneira) com areia cimento e água. A proporção em volume é de 14:1 de areia e concreto com 10% de água. Após suficientemente misturada, esta composição de materiais é aplicada na vala e compactada por vibradores mecânicos.

A caracterização de *backfill's* com ou sem aditivos foi pesquisada por (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) em experimento comparativo entre os diversos materiais e ensaios, cujos resultados são apresentados na Figuras 2.18 e 2.19.

Ensaio de resistividade térmica e friabilidade são os mais significativos para as argamassas. O corpo de prova para a argamassa para ensaio de laboratório é preparado e curado durante 28 dias. Os estudos de (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) concluíram que as misturas aditivadas com resíduos siderúrgicos não apresentaram redução significativa de valores de resistividade térmica, em contraponto à adição de grafite, que proporcionou a redução esperada na resistividade térmica do composto. As medidas de resistividade térmica das argamassas, aditivadas ou não, são apresentadas na Figura 2.18 para granito moído e areia comum. Nos estudos de (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) a mistura com proporção de areia:cimento de 40:1 foi descartada para aplicação como backfill, pois a resistividade térmica do experimento resultou demasiada alta.

Figura 2. 18 - Resistividade térmica das argamassas.

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

Com relação à friabilidade, na Figura 2.19 nota-se a boa friabilidade destas argamassas das misturas com proporção mais reduzida de cimento (40:1) com ou sem grafite. Nota-se sensível aumento da friabilidade em misturas com maior proporção de areia, independentemente do tipo de areia, aditivo ou densidade (BARTOLI e ALMEIDA, 1987).

Figura 2. 19 - Friabilidade das argamassas.

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

Backfill's Artificiais

São considerados *backfill's* artificiais todos os materiais naturais (areias selecionadas e pedra moídas) com as misturas de aditivos cerâmicos e aditivos oligoméricos e poliméricos. O trabalho precedente de (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) apresenta como melhor solução para os materiais bimodais conforme mostrado na Figura 2.20.

Todas as demais soluções de material artificial apresentam aumento de custo de materiais e processo, além de oposição de agentes ambientais. A contribuição adicional desta investigação está na simplificação de metodologia. Os valores de grau de saturação crítico dos materiais bimodais podem ser encontrados através de um ensaio simples de medição da resistividade a seco.

Figura 2. 20 - Medição de resistividade à seco.

$$h_s = \frac{md}{\gamma G}$$

	Arenoso	Argiloso	Areia selecionada	Pedra moída bimodal
m	0,12	0,22	0,07	0,04
d	1,60	1,50	1,70	2,00
γ	1,00	1,00	1,00	1,00
G	0,42	0,47	0,25	0,22
hs	0,46	0,70	0,48	0,38

Fonte: (ALMEIDA, 2011), adaptado.

Sendo:

h_s Grau de saturação do solo [%]

h_{crit} Grau de saturação crítico do solo [%]

m Conteúdo de umidade do solo [%]

d Densidade a seco do solo [g/cm³]

γ Densidade específica da água [g/cm³]

G Variável empírica []

O melhor *backfill* disponível no Brasil atualmente

O melhor *backfill* comercial disponível no Brasil atualmente é o *backfill* bimodal à base de granito moído (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), que possui resistividade térmica à seco de 1,0 K.m/W. Sua implantação, além de demorada e dependente de um rígido controle durante a sua execução, encontra-se no seu limite de resistividade térmica.

***Backfill* fluidizado termoestabilizado e autocompactante**

Atualmente existe um projeto de pesquisa e desenvolvimento (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019) em curso, cujo objetivo principal é o de desenvolver novo material a ser utilizado como *backfill* em banco de dutos para cabos isolados de linhas subterrâneas com resistividade térmica reduzida comparativamente à dos materiais atualmente empregados com esta finalidade no Brasil.

Este material tem potencial para substituir os *backfills* atuais e terá características físicas que possibilitem sua aplicação de forma mecanizada e elimine a necessidade da compactação tradicional. O novo *backfill* possibilitará reduzir os custos dos investimentos em linhas subterrâneas através da diminuição da bitola dos condutores dos cabos isolados para a mesma capacidade de corrente e da redução do tempo de duração das obras civis, com resistividade térmica máxima a seco entre 0,75 e 0,80 K.m/W (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019).

2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SOLOS E ATERROS ESPECIAIS

Todas as linhas de transmissão subterrâneas devem sempre considerar a aplicação de aterros especiais, por possuírem pelos menos 3 materiais de reaterro diferentes entre si.

Na Figura 2.21 estão apresentados dois domínios de campo térmico: (i) do lado esquerdo, em simetria três cabos instalados em trevo (trifólio) com o segundo trifólio desligado. Neste domínio está explícito três materiais diferentes: solo externo à trincheira, o *backfill* em torno aos cabos e o material de reaterro sobre o *backfill* – (ii) do lado direito está o domínio transformado do mesmo campo térmico onde os materiais apresentam-se com seus papéis bem definidos na condução de calor (ALMEIDA, 2011).

Figura 2. 21 – Domínios real e transformado em linhas de transmissão subterrâneas.

Fonte: (ALMEIDA, 2011), adaptado.

Os domínios denominados *backfill* e material de reaterro fazem parte do conjunto de obras civis executadas para a realização da linha. O domínio aqui chamado de “solo natural” é o conjunto de todo material circunstante à trincheira ao longo da linha.

O material aplicado no interior da vala (*backfill*) é o componente da assinatura sobre a qual o projetista tem domínio. Este podem ser qualificados conforme a especificação de ensaios já apresentadas e aplicadas sobre os cabos

com as melhores práticas dos construtores civis. Todavia o solo natural é o componente da assinatura ambiental que é praticamente desprezada nos dias atuais.

O solo natural variará ao longo da trincheira dos cabos, enquanto o *backfill* e material de reaterro estarão praticamente inalterados. Daí a necessidade que um inventário de resistividade térmica e temperatura ao longo da rota de instalação dos cabos de forma a determinar a margem estatística de capacidade de condução de corrente dos cabos.

A sensibilidade da resistividade térmica em relação ao teor de umidade é importante devido à secagem do solo que pode ocorrer na presença de aquecimento por cabo (DONNAZZI, OCCHINI e SEPPI, 1979), (KEMA e HEIDEMIJ, 1981), (RADHAKRISHNA, H. S., 1981), (BRACKELMANN, 1984), (BARTOLI, 1986), (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), (FERREIRA, 1993), (FREITAS, 1995), (CIGRE, 2015), (CIGRE, 2017), (ALMEIDA, 2011).

Caso as medições não sejam realizadas, restam poucas alternativas para determinar a resistividade térmica do solo nativo, pois este é um parâmetro não comumente catalogado, exceto dentro da comunidade de dimensionamento de cabos, podendo neste caso ser empregado o método CIGRE4 (CIGRE, 1986) conforme já mencionado neste trabalho. Um bom ponto de partida é o padrão IEC 60287-3-1 “Cabos elétricos - Cálculo do dimensionamento de corrente - Parte 3-1: Seções sobre condições de operação - Condições de operação de referência e seleção do tipo de cabo”, no entanto, estes valores devem ser usados com cuidado.

Vários parâmetros afetam a resistividade térmica do solo:

- Composição do solo
 - a. Tipo de mineral
 - b. Conteúdo orgânico
 - c. Contato entre partículas
- Textura
 - a. Fino - grosso
 - b. Distribuição de tamanho de grão
 - c. Natural ou moído artificialmente
- Teor de água

- a. Úmido, parcialmente seco, seco
- Densidade seca
 - a. Conteúdo sólido
 - b. Solto, compacto, denso
 - c. Tamanho e distribuição de poros
- Outros fatores
 - a. Perda de finos
 - b. Sais / minerais dissolvidos.

Uma vez concluída a instalação, a densidade seca, o tipo e a maioria dos outros fatores do solo não devem sofrer alterações. Apenas o teor de umidade irá mudar devido às variações climáticas e hidrológicas sazonais ao longo do ano. O cabo em si também pode influenciar negativamente o teor de umidade do solo por meio do processo de secagem relacionado à variação da potência transportada.

Estabelecer as propriedades térmicas para o cálculo significa que, uma vez que as propriedades do solo são bem conhecidas, uma escolha deve ser feita em relação ao teor de umidade a ser levado em conta. Muitas vezes é possível detectar o menor nível do lençol freático em uma análise de solo. Dadas as propriedades do solo a partir deste nível de lençol freático, o menor teor de umidade do solo ao redor dos cabos de energia pode ser deduzido. Este menor teor de umidade é posteriormente usado para calcular (ou medir - em um ambiente de laboratório) as propriedades térmicas do solo ao redor do cabo de energia para considerações de dimensionamento dos condutores. É importante observar que, em uma situação normal, geralmente o teor de umidade no solo será maior do que a esperada com base no menor lençol freático. Neste sentido, as propriedades térmicas do solo podem ser melhores do que nas condições adotadas para os projetos. Tal possibilidade deve ser considerada ao realizar medições de campo, ou seja, para o efetivo dimensionamento do condutor é necessário conhecer a pior situação térmica, no entanto, uma medição de campo indicará a situação real instantânea, que pode ser diferente da situação mais crítica. A Figura 2.22 indica que a diferença entre os dois pode ser muito grande. Por exemplo, se o teor de umidade da areia uniforme for medido a 15% de umidade, a resistividade térmica será inferior a 0,5 K.m/W (ponto A). No entanto, as condições podem mudar com a secagem da

areia e a resistividade térmica aumentará para mais de 2,5 K.m/W (ponto B) (CIGRE, 2015).

Figura 2. 22 - Resistividade térmica de vários solos em função do teor de umidade, com domínios úmido (A) e seco (B).

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

2.7. SELEÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE DO SOLO

É notório que temperatura do solo impõe uma limitação na elevação de temperatura permitida nos condutores de cabos e, portanto, impõe restrição à capacidade de carga dos cabos, no entanto, a temperatura do solo natural na posição de instalação de uma linha de transmissão de potência com cabos isolados

e diretamente enterrados, sempre foi tratada com certa indiferença pelos engenheiros.

No modelo de Kennelly (KENNELLY, 1893), por similitude, o campo térmico (temperaturas) gerado pela fonte dissipativa (cabo), em regime estacionário, se comportava fenomenologicamente como uma carga elétrica diante de outra carga de sinal oposto. As linhas de fluxo elétrico eram semelhantes às linhas de fluxo térmico e as equipotenciais elétricas e térmicas eram ortogonais às linhas de fluxo. Esta descrição anterior era suficiente para declarar que o problema elétrico e o problema térmico eram análogos ao problema matemático de Dirichlet, “*Conheço os potenciais nas fronteiras e quero saber os potenciais entre eles*” (ALMEIDA, 2011).

As equações de Kennelly seriam perfeitamente aplicáveis ao solo natural fosse caso este fosse um meio sem nenhuma transformação de fase, tal transformação é constante neste meio. Entretanto, segundo (CARSLAW e JAEGER, 1959) em camadas mais profundas, observa-se uma variabilidade decrescente temperatura e de outras funções de estado, de forma que a 1,5 metros de profundidade a temperatura do solo natural é razoavelmente estável, estimada mediamente no globo em torno de 15°C. Porém, segundo (VRIES, 1958) a temperatura local a 1,5 metros de profundidade varia de local para local dependendo da formação dos componentes do solo natural.

Os padrões IEC adotam a hipótese de (KENNELLY, 1940), assumindo que a superfície da terra deve ser uma isoterma.

Na norma IEC 60287, essa isoterma é chamada de θ_a , que pode variar substancialmente dependendo da localização geográfica e da época do ano. A temperatura ambiente é, de acordo com a IEC 60287-1-1, seção 1.4.1.1, a temperatura do meio circundante sob condições normais, em uma situação na qual os cabos são instalados ou devem ser instalados, incluindo o efeito de qualquer fonte local de calor, mas não o aumento da temperatura na vizinhança imediata dos cabos devido ao calor que daí advém. Essas temperaturas geralmente são estabelecidas durante um levantamento térmico de rota ou com base em valores históricos.

Fatores que determinam a temperatura do solo podem ser agrupados em três categorias gerais: variáveis meteorológicas, de terreno e subsuperficiais.

As diferenças regionais de grande escala na temperatura do solo são determinadas principalmente por variáveis meteorológicas, como radiação solar, temperatura do ar, tempestades e precipitação. As variações micro ou locais são causadas por diferenças no terreno, características da superfície e propriedades térmicas do solo (incluindo teor de umidade e / ou lençol freático)

Os elementos meteorológicos, principalmente a radiação solar e a temperatura do ar, influenciam a temperatura da superfície e da subsuperfície, afetando a taxa na qual o calor é transferido para ou da atmosfera e do solo. A radiação solar é provavelmente o fator mais importante. Outros fatores meteorológicos, como vento ou chuva, podem causar variações locais significativas.

Uma vez que muitos desses parâmetros mudam em um ciclo sazonal, ou irregularmente com o tempo, é impossível prever exatamente a temperatura da Terra em um determinado local ou em qualquer momento no futuro, particularmente em locais próximos à superfície da Terra. As previsões da temperatura da Terra, portanto, são de natureza estatística e alguns desvios em relação à média são esperados em qualquer dia, estação ou ano.

Idealmente, a temperatura ambiente deve ser obtida a partir de medições. Referências bibliográficas publicadas, como a IEC 60287, incluem tabelas de temperatura ambiente por região, mas geralmente não são suficientes para dimensionar precisamente os condutores de uma linha subterrânea. Métodos adicionais podem ser usados para caracterizar a temperatura ambiente do solo usando dados de temperatura do ar. As condições da superfície e a profundidade do enterro, particularmente para profundidades mais rasas, devem ser consideradas ao selecionar uma temperatura para as classificações. Para profundidades inferiores a 0,5-0,75 m, a temperatura ambiente pode ser 5°C maior que a temperatura predominante na área devido à maior absorção solar abaixo do pavimento asfáltico.

Os cabos colocados no fundo de uma grande massa de água, mas não enterrados, geralmente não têm restrições térmicas devido ao calor sendo absorvido e afastado dos cabos. No entanto, muitas instalações submarinas

envolvem a incorporação dos cabos abaixo do leito do mar. Nestas situações, a temperatura da subsuperfície estará estreitamente alinhada com a temperatura da água na mesma profundidade e moderada pelas flutuações sazonais na temperatura da água.

2.8. PRÁTICAS COLETADAS PELO CIGRE EM 2015

Esta seção apresenta os resultados de pesquisa realizada pelo CIGRE, apresentada em (CIGRE, 2015), demonstrando as práticas adotadas por projetistas, usuários e fabricantes em diferentes países, com objetivo de entender como os dados de entrada são deduzidos e adotados ao redor do mundo, relacionados aos seguintes tópicos:

- Método de instalação
- Solo / leito do mar / temperatura ambiente do túnel
- Resistividades térmicas do solo / leito do mar
- Temperatura de secagem e resistência térmica do solo
- Limitação de fatores nos cálculos de Dimensionamento atual.

Método comum de instalação

(CIGRE, 2015) apurou em pesquisa realizada a nível internacional que a instalação mais comum pode ser definida por:

- Cabos de alta tensão de núcleo único
- Enterrado diretamente
- Instalado em trevo próximo ou em formação plana
- Instalado entre 0,4 m e 2,0 m de profundidade
- Com pavimento / asfalto / estrada como cobertura típica no topo da vala.

Deve-se enfatizar que as instalações específicas são mais dominantes por continente, como bancos de dutos revestidos de concreto na América do Norte e túneis enterrados na Ásia.

Como os cabos são frequentemente instalados em áreas urbanas, pavimentos asfálticos frequentemente cobrem o topo da vala. O tipo de superfície do solo pode influenciar a temperatura ambiente, absorvendo a radiação solar, ou pode influenciar o teor de umidade do solo. Isso raramente é considerado pelos projetistas.

Temperatura ambiente do solo / leito do mar / túnel

Pesquisa realizada por CIGRE, 2015, aponta que a temperatura do solo ou do fundo do mar é frequentemente assumida (72%) e ocasionalmente medida (21%). As razões para a realização de medições no local são diversas e foram relatadas principalmente para circuitos de cabo submarinos, fornecidos pelo cliente, e feitos para cabos diretamente enterrados.

Vários métodos para medir a temperatura do solo foram relatados nesta pesquisa, principalmente utilização de termopares em várias profundidades de instalação (0,5 m, 1,0 m, 1,2 m, 1,5 m e até 5,0 m) ao longo da rota do cabo (a cada 500 m ou em possíveis pontos quentes). O uso de medições DTS¹⁴ tem aumentado: a temperatura ambiente do solo é então medida antes do circuito entrar em operação. Alguns entrevistados indicaram que as medições são feitas em época do ano com as temperaturas ambientes mais altas. As temperaturas do solo e do leito do mar são na maioria das vezes assumidas pelo projetista, muitas vezes devido à falta de informações detalhadas sobre as condições do local.

O uso de valores sazonais ou regionais é confirmado por, respectivamente, 51% e 40% das respostas.

A Figura 2.23 apresenta as temperaturas típicas do solo adotadas por país, para condições de calor, com a Figura 2.24 mostrando o mesmo para as condições de frio.

¹⁴ DTS: Distributed Thermal System. Sistema de monitoramento de temperatura distribuído, permite monitoramento do condutor ao longo da extensão, em tempo real e com armazenamento de dados.

Figura 2. 23 - Faixa de temperaturas típicas para solos em condições quentes, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Figura 2. 24 - Faixa de temperaturas típicas para solos em condições frias, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

As referências de dados coletados por CIGRE, 2015 para as temperaturas do solo, fundo do mar e de túnel foram relatadas conforme a distribuição apresentada na Tabela 2.2:

Tabela 2. 2 - Distribuição de pesquisados sobre metodologia de aquisição de dados de temperatura do solo, fundo do mar e túnel.

Forma de aquisição de dados	Respostas
Assumidas	26
Medidas	17
Adotadas conforme padrões locais	15
Adotadas conforme dados históricos	8
Fornecidos pelo cliente	8
Baseadas em dados meteorológicos	3

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

A temperatura ambiente é um parâmetro importante nos cálculos de dimensionamento, no entanto, nota-se que a maioria dos valores para este parâmetro é assumida e varia consideravelmente por usuário ou por região. A norma internacional IEC 60287-3-1 'Condições de operação' é raramente mencionada como referência naquela pesquisa.

Resistências térmicas do solo / leito do mar

Segundo (CIGRE, 2015), 70% dos pesquisados indicam que as resistividades térmicas do solo ou do fundo do mar consideradas são de valores assumidos. As razões mencionadas incluem: falta de dados, projetos de curta extensão, aplicações de baixa tensão.

No entanto, há um interesse crescente em medir as resistências térmicas do solo / fundo do mar, como relatado por 25 (vinte e cinco) respostas, especialmente para novos projetos de cabos, ligações submarinas, solicitação de clientes e condições críticas do local, como em áreas congestionadas.

Métodos relatados de medição das resistividades térmicas solo / fundo do mar:

- Frequência: amostras de solo são coletadas a cada 50m a 500m ou em pontos quentes suspeitos ou aleatoriamente.
- Localização: profundidades específicas, camadas específicas na trincheira e mudanças nos tipos de solo.

- Parâmetros medidos: resistividade térmica, umidade e densidade, temperatura crítica.
- Deduzir o pior cenário para fins de engenharia: maior resistividade térmica, ponto mais profundo da rota ou condições do solo com solo total ou parcialmente seco.

Os usos de valores sazonais e / ou regionais não são aplicados pela maioria das respostas (63% e 55%, respectivamente). As Figuras 2.25 e 2.26 apresentam uma visão geral das resistividades térmicas do solo e do fundo do mar, respectivamente, aplicadas em vários países.

Figura 2. 25 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos em estações quentes, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Figura 2. 26 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos em estações frias, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Referências reportadas para valores de resistividade térmica distribuídos conforme a Tabela 2.3:

Tabela 2. 3 - Distribuição de pesquisados sobre metodologia de aquisição de dados de resistividade térmica do solo, fundo do mar e túnel.

Forma de aquisição dos dados	Respostas
Dados históricos e/ou artigos	23
Assumidas	17
Adotadas conforme padrões locais	16
Fornecidos pelo cliente	6
Testes laboratoriais em amostras	2

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Secagem do solo e resistividade térmica

Outro parâmetro importante para o cabo enterrado direto é, além das resistências térmicas do solo, a temperatura de secagem do solo ao redor do circuito de cabos. Segundo (CIGRE, 2015) a secagem do solo é considerada pela maioria dos pesquisados (63%), mas mais de um terço deles (36%) não considera este parâmetro. As razões para considerar a secagem do solo são: características conhecidas do solo, lençol freático, especificação do cliente, classe do cabo.

As Figuras 2.27 e 2.28 apresentam uma visão geral da resistência térmica aplicada típica do aterro, como em uso em vários países, para o solo ressecado e para o solo úmido.

Figura 2. 27 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos ressecados, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Nota: a alta resistividade térmica relatada para os Países Baixos refere-se à turfa seca.

Figura 2. 28 - Faixa de resistividades térmicas típicas para solos úmidos, em torno de solos secos, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

A variação nas resistências térmicas aplicadas para solo seco é considerável, enquanto que, para o solo úmido é notavelmente uniformemente. A Figura 2.29 resume as respostas para os valores críticos de isoterma.

Figura 2. 29 - Isotermas críticas típicas para solos ressecados, por país.

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

As referências reportadas para os valores dados nas Figuras 2.28 a 2.29 seguem a distribuição da Tabela 2.4:

Tabela 2. 4 - Distribuição de pesquisados sobre questões envolvendo secagem de solos e resistividade térmica.

Forma de aquisição dos dados	Respostas
Medidas	13
Adotadas conforme padrões locais	9
Respostas da Literatura	6
Assumidas	4
Adotadas conforme dados históricos	3
Especificada pelo cliente	3
Resposta da prática comum	1

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

Fatores limitantes nos cálculos de dimensionamento

A influência de outras fontes de calor no dimensionamento de cabos é tratada de maneiras diferentes pelos respondentes da pesquisa realizada por (CIGRE, 2015), variando de 'calcular a influência exata' (68%), via 'adicionando uma margem à temperatura ambiente' (30%) e 'utilização de tabelas de redução de notação' (26%) para 'não considerado' (4%).

Para o cálculo da influência exata, a publicação (IEC, 2014) é a referência governante (20%), seguido pelo uso de software comercial (19%) e FEM (13%). A margem que é adicionada à temperatura ambiente varia de +5 °C (27%) a +10 °C (20%), enquanto +15°C e +20°C são relatados por um entrevistado cada. Para tabelas de avaliação, padrões como IEC, VDE2 ('Verband der Elektrotechnik', German association) e JCS3 (Japanese Electric Wires & Cable makers) são usados (31%) ou gerados por software (15%).

Outra abordagem que é adotada por alguns países, de acordo com os resultados de CIGRE, 2015, é levar em conta uma separação mínima entre o circuito de cabos e a fonte de calor para assegurar a independência térmica dos sistemas de cabos.

O método IEC / Neher-McGrath (NEHER e MCGRATH, 1957) é o método predominante para cálculos de dimensionamento de cabos. Tais cálculos são comumente realizados para todos os estágios da vida útil do sistema a cabo e

também são amplamente utilizados para determinar a influência de fontes secundárias de calor.

Uma temperatura máxima do condutor é usada como uma limitação para as condições operacionais em 85% de todos os pesquisados por (CIGRE, 2015). Aqueles que não usam a temperatura máxima do condutor mostram claramente que o método de cálculo IEC é realmente implementado e que a limitação da corrente nominal através da temperatura máxima do condutor é substituída por diferentes parâmetros limites como, por exemplo, temperatura limite da superfície do cabo que não provoque secagem do solo ao redor do cabo.

As respostas à pesquisa demonstram com mais detalhes quais parâmetros limitantes alternativos estão em uso. A diferenciação das respostas mostra também um claro entendimento do modelo físico em uso do padrão IEC. As limitações mais comuns do projeto térmico são a temperatura do condutor e o solo nativo / condições ambientais / condições de operação.

A pesquisa realizada por (CIGRE, 2015) não fez a pergunta sobre outras limitações de temperatura. Em alguns casos raros, a temperatura máxima do aterro / banco do duto é limitada para evitar a secagem do solo.

Com relação à utilização de um ciclo de carga diária assumido em vez de cálculos baseados em uma carga contínua, também não há consenso. Assumir um ciclo de carga geralmente resulta em correntes de carga de pico significativamente mais altas do que aquelas com carga contínua. A maioria dos usuários utilizou ciclos de carga diários assumidos, enquanto 32% dos usuários preferiram calcular o dimensionamento com base em cargas contínuas. Embora alguns desses usuários possam não estar carregando totalmente seus cabos, dado que a maioria dos cabos provavelmente não estará em carga contínua, alguns usuários podem estar usando classificações dinâmicas. Variações do fator de carga até 0,7 são obviamente uma prática comum e, em alguns casos, valores abaixo de 0,6 e mais podem ser encontrados. Alguns outros usam medições como base para o fator de carga.

As seguintes razões para falhas de origem térmica nos sistemas a cabo devido ao superaquecimento foram relatadas na pesquisa de (CIGRE, 2015), conforme a distribuição da Tabela 2.5:

Tabela 2. 5 - Distribuição de pesquisados sobre falhas de origem térmica em cabos.

Respostas à Falha de origem térmica em cabos, devido a superaquecimento	Respostas
Sobrecarga	4
Seleção incorreta de cabos e sistemas de ligação	2
Alta resistência térmica do solo	2
Mudanças nas condições de operação	2
Situação em campo diferente da resposta da situação de Engenharia	2
Impactos térmicos em cabos laminados	1
Tempo de vida restante excedido	1
Elevada quantidade de cabos de 11kV sob asfalto, enterrados na areia da praia	1

Fonte: (CIGRE, 2015), adaptado.

A maioria das falhas de cabos devido ao superaquecimento parece estar relacionada às diferenças à adoção dos parâmetros de entrada de cálculos durante a fase de engenharia e na situação in situ, ou seja: sobrecarga, mudanças nas condições de operação e situações de campo diferentes daquelas projetadas.

2.9. A ASSINATURA AMBIENTAL

A assinatura ambiental é um conceito proposto por (ALMEIDA, 2017) e pode ser apreciado como uma aplicação do capítulo de topologia. A topologia é um campo da matemática, além dos campos da álgebra da análise. Numa simplificação, a topologia pode ser considerada uma extensão da geometria.

Pode-se dizer que existe uma topologia E_π *Environmental Print* sobre um conjunto M_λ de um meio de dimensão λ , quando as assertivas a seguir existirem:

$$\{\phi, M_\lambda\} \subset E_\pi \quad \text{Topologia Banal}$$

$$\{X_{E_\pi}^i \cup X_{E_\pi}^y\} \subset E_\pi$$

$$\{X_{E_\pi}^i \cap X_{E_\pi}^y\} \subset E_\pi$$

Nestas condições E_π é denominado espaço topológico e poderemos de uma outra forma representar o par ordenado (M_λ, E_π) sendo um conjunto M_λ e uma topologia E_π .

A topologia E_π mais extensa para uma linha de transmissão subterrânea com cabos isolados, com corrente circulante nos condutores é o ensemble canônico de Gibbs (GIBBS, 1960).

Neste espaço topológico são perfeitamente aplicáveis as 12 equações de Maxwell para a termodinâmica, sendo consideradas as mais importantes para esta topologia as equações de 2.17 a 2.19, conhecidas como equações M10, M11 e M12, aplicáveis à energia livre de Gibbs.

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,N} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,N} \quad \text{Equação M10 de Maxwell} \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial N}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_{T,N} \quad \text{Equação M11 de Maxwell} \quad (2.18)$$

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial N}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_{p,N} \quad \text{Equação M12 de Maxwell} \quad (2.19)$$

Além destas equações, na mesma topologia é aplicável a diferencial da energia de Gibbs;

$$\partial G = -S\partial T + V\partial p + \mu\partial N \text{ com variáveis independentes } (T, p, N) \quad (2.20)$$

Da diferencia total da energia livre de Gibbs extraímos;

$$\frac{\partial G}{\partial T} = -S \quad \text{Entendimento Brackelmann} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial G}{\partial p} = V \quad \text{Entendimento Donazzi} \quad (2.22)$$

que são as assinaturas ambientais para existência de uma isoterma crítica (BRACKELMANN, 1984) com entropia praticamente constante, ou uma fronteira de equilíbrio de um grau de saturação crítico entre fase vapor e fase líquida dentro de um volume V .

O espaço topológico de Gibbs contém todos demais espaços topológicos matemáticos, como a transformada conforme e todas geometrias de dutos e bancos de dutos possíveis.

3. MODELAGEM DA INTERAÇÃO ENTRE CABO E SOLO

Neste capítulo será realizada uma explanação sobre a abordagem das questões relacionadas à interação entre os condutores de uma linha de transmissão subterrânea do ponto de vista termodinâmico, contrapondo as experiências de diversos estudiosos do tema, buscando conciliar as diversas teses envolvidas de forma a conciliá-las na consolidação de metodologia alternativa para a modelagem desta interação.

3.1. A TERMODINÂMICA DO PROCESSO DE TRANSFÊRENCIA DE CALOR E MASSA EM UM MEIO POROSO

O problema de transferência de calor e massa em meio poroso é de extremo interesse para a agricultura, seja na secagem de grãos, seja na fertilidade dos solos, quando a fase “água” está em jogo.

Daniel A. De Vries foi o pioneiro no estudo deste tema, fez seu PhD nesta área e desenvolveu o modelo de mecânica do meio contínuo e idealizou a metodologia de medida com sonda agiforme.

Esta seção revisita os conceitos por ele usados nesta área, sem fazer menção aos desenvolvimentos ulteriores, pois mesmo contribuindo com um trabalho pioneiro, deixa este como a melhor referência sobre o tema. De Vries apresentou este trabalho como parte de seu PhD pela Universidade de Eindhoven em 1948. Nesta revisita será usado o artigo de 1958, pois trata de uma abordagem mais aderente ao tema de cabos enterrados.

EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE DANIEL DE VRIES

As duas equações de Daniel de Vries são encontradas na forma diferencial ou em derivadas parciais (VRIES, 1958) como segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + (\nabla K) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{vap} \nabla \theta) \end{array} \right. \quad (3.2)$$

A modelagem presume que a transferência de calor devido à transferência de massa é desprezível, e que o tempo de variação do vapor condensado é também desprezível. Deste modo podemos encontrar também as equações anteriores escritas da seguinte maneira;

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(D_{\theta} \text{grad} \theta + D_T \text{grad} T) - \frac{\partial K}{\partial z} \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda + \rho_l L D_{Tv}) \text{grad} T + \text{div}(\rho_l L D_{\theta v}) \text{grad} \theta \end{cases} \quad (3.3)$$

$$(3.4)$$

Independentemente do ângulo de observação os dois conjuntos de equações possuem sempre 5 parâmetros a serem determinados para sua efetiva solução.

Entretanto, o par de equações está enquadrado no domínio das equações parabólicas e isto deixa sempre patente que as soluções ficam no domínio das probabilidades (propriedade das equações parabólicas). Isto não é um prejuízo, mas antes de tudo uma virtude, pois permite sempre supor que no espaço de fase móvel (massa) haverá sempre algum ponto de equilíbrio (média). Neste ponto aparece a inspiração para uso da termodinâmica que trata dos estados em equilíbrio.

Em seu trabalho, (HUSSAIN, 1997) parte das equações de Vries e seu andamento parabólico e leva no estacionário para o equilíbrio termodinâmico de uma isoterma crítica ou um grau de saturação crítico dentro do *backfill* e de todas as assinaturas ambientais da linha de transmissão subterrânea.

A brochura CIGRE (CIGRE, 2017) apresenta vários trabalhos conduzidos para modelagem da transferência de calor e massa no meio poroso. Alguns tentam determinar se o meio poroso é estável ou instável (BATES, CAIN e MALMEDAL, 2016), mas no limite de Gibbs (GIBBS, 1960) todo meio poroso, entre o cabo e o solo natural ou com *backfill*, podem ser observados com os entendimentos de Donazzi e Brackelmann;

$$\partial G = -S\partial T + V\partial p + \mu\partial N \quad (3.5) \Rightarrow \begin{cases} \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p,N} = -S & \text{Brackelmann} & (3.6) \\ \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,N} = V & \text{Donnazzi} & (3.7) \end{cases}$$

Neste trabalho o comportamento das duas diferenciais será unicamente definido pelos materiais da assinatura ambiental caracterizados os estados extremos de desempenho de cada um deles.

3.2. TERMODINÂMICA CLÁSSICA OU MECÂNICA DO MEIO CONTÍNUO

Toda modelagem clássica passa inexoravelmente pelas equações de Phillip e De Vries, apresentadas anteriormente que é um extremo esforço dentro da mecânica do meio contínuo (PHILIP e VRIES, 1957). Apesar de toda beleza matemática que estas equações apresentam, sua utilização em projeto de linhas de transmissão subterrânea é demasiadamente trabalhosa, requerendo uma profunda fase de experimentação para qualificar os materiais para uso como materiais de engenharia.

A termodinâmica clássica oferece os entendimentos de Brackelmann e Donazzi que serão usados neste trabalho com as equações 3.5 a 3.7.

A isoterma crítica existe ou o equilíbrio de fases de pressão parcial de água em fase vapor e líquida se faz na mesma fronteira da isoterma crítica, e o domínio desta fronteira estará sempre dentro de um *backfill* estabilizado e neste trabalho será um material fluidizado auto aglomerante com resistividade térmica conhecida entre os estados totalmente seco e o estado totalmente saturado. Todos estes conjuntos estarão dentro de uma assinatura ambiental, conforme apresenta a Figura 3.1.

Figura 3. 1 - Assinatura ambiental: Parâmetros críticos.

Fonte: (ALMEIDA, 2017), adaptado.

Na figura 3.1, a curva em vermelho representa o comportamento típico da resistividade térmica de um material qualquer em resposta à variação do teor de umidade deste material. É importante compreender que a maior resistividade térmica de um material é atingida em seu estado completamente seco. À medida que o material vai adquirindo umidade, a resistividade térmica sofre redução não linear, até atingir um patamar a partir do qual a adição de água deixa de influenciar positivamente a resistividade térmica do material. A curva formada tem o aspecto da curva típica da distribuição normal de Gauss.

Consideremos hipoteticamente que este material seja o backfill bimodal, instalado em uma vala típica, revestindo um condutor típico de linha de transmissão subterrânea. À medida que o condutor é submetido à condução de corrente, o calor irradiado pelo condutor atravessa todas as camadas do cabo ao redor do condutor de forma isotrópica, chegando ao *backfill*. Este calor continua se difundindo através do *backfill* para regiões mais afastadas do cabo, formando regiões circulares de mesma temperatura ao redor deste, chamadas isotermas, de forma que isotermas mais distantes do cabo têm temperaturas menores que aquelas mais próximas.

Também à medida que a temperatura das regiões mais próximas ao cabo aumenta, o *backfill*, que é composto por sólidos, vazios e água, tem sua pressão parcial de vapor aumentada nesta região, expulsando a água para regiões mais afastadas e de isothermas de menor temperatura. À medida que a umidade migrante encontra isothermas de menor temperatura a pressão parcial diminui, até chegar a uma determinada isoterma onde a pressão parcial de vapor se equilibra com a pressão neutra do meio ambiente, de forma que, para cada unidade de água nas fases líquida ou vapor que o sistema conseguir forçar para fora desta isoterma, o meio externo conseguirá forçar uma unidade de água na fase líquida para dentro da isoterma. Essa isoterma, cuja temperatura é chamada de temperatura crítica, ocorre a uma determinada distância isotrópica ao redor do cabo, chamada de diâmetro crítico. Na região do diâmetro crítico ocorre o equilíbrio termodinâmico de temperatura e pressão entre o volume de controle representado pela região dentro do diâmetro crítico e o meio externo¹⁵. O teor de umidade presente na região do diâmetro crítico é conhecido como grau de saturação crítico, que, quando aplicado à um determinado material o levará a uma determinada resistividade térmica, chamada de resistividade térmica crítica.

Ainda com impossibilidade de determinar um $\{D_{crit}\}$ dentro do *backfill* estabilizado ou dentro da assinatura ambiental, será assumido que este diâmetro estará sempre dentro da assinatura do *backfill* e os demais materiais da assinatura estarão apenas parcialmente secos.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO *BACKFILL* FLUIDIZADO

Na pesquisa de (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019) o material foi modelado usando a teoria de transferência de calor e massa em meio poroso. O objetivo foi redirecionado para um material que tivesse uma resistividade térmica nos estados seco e saturado, que seriam:

$$\begin{aligned}\rho_{seco} &= 0,75 \text{ K.m/W} \\ \rho_{saturado} &\cong 0,42 \text{ K.m/W}\end{aligned}$$

¹⁵ Na modelagem do ensemble canônico, o meio externo é um reservatório termodinâmico infinito no sentido de Gibbs com temperatura e pressão flutuando de maneira estável

O material seria aplicado com consistência fluida de forma a evitar a etapa de compactação, indesejável em obras realizadas em ambientes urbanos e poderia, no limite, operar à seco caso toda a umidade em torno ao cabo fosse eliminada. Estes limites foram alcançados considerando trabalhos anteriores de (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), e a prática AMERICANA (DETTTER, CURTIS e STEWART, 2014) reportada pela concessionária Seattle City Light, conforme pode ser observado na Tabela 3.1:

Tabela 3. 1 - Requisitos de desempenho – Backfill fluidizado - Seattle City Light.

Critério	Unidade	Backfill térmico fluidizado de baixa resistência		Backfill térmico fluidizado de alta resistência		Método de teste
		Mistura projetada	Campo de Testes	Mistura projetada	Campo de Testes	
Resistividade térmica						
Máxima à 0% de umidade	(°C.m)/W	100	100	75	75	Consultoria
Máxima à umidade crítica	(°C.m)/W	70	80	60	65	Consultoria
Resistência máxima a compressão em 28 dias	Libras/poℓ²	100	100	3000	3000	ASTM C873
Resistência mínima a compressão em 28 dias	Libras/Poℓ²	130	150	na	na	ASTM C873
Slump mínimo	Pol	6	6	6	6	ASTM C143
Slump máximo	Pol	9	9	9	9	ASTM C143

Fonte: (DETTTER, CURTIS e STEWART, 2014), adaptado.

O material deveria seguir o modelo com curva de resistividade térmica por teor de umidade próxima à normal (Gauss);

Para ter uma característica fluidizável e autocompactante o material deveria seguir os ensaios especificados:

- 1- Densidade do grão
- 2- Densidade do aglomerado
- 3- Granulometria do aglomerado
- 4- Densidade a seco
- 5- Densidade saturada em água
- 6- Resistividade térmica do material saturado em água
- 7- Resistividade térmica do material conformado e seco em estufa

- 8- Ensaio de friabilidade
- 9- Ensaio de abatimento (Slump)

Um ponto importante do plano de desenvolvimento era que os aglomerados a serem utilizados como matéria prima existissem geograficamente próximos às obras, o que levou à decisão de utilização de estudar-se rochas magmáticas de basalto ou granito. Também seria fundamental o exame de diversas cargas minerais para melhoria da resistividade, sendo os materiais classificados pela granulometria e densidade como parâmetros essenciais, conforme Figura 3.2

Figura 3. 2 - Granulometria Talbot para areias e rochas moídas.

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987), adaptado.

Já foi mencionado que os modelos de cálculo têm consenso de que o *backfill* na região dentro da isoterma crítica, sobretudo nas proximidades de contato com o cabo, consideram a secagem completa do material. Tal decisão, evidenciada nos estudos de (BRACKELMANN, 1984) e (PILGRIM, SWAFFIELD, *et al.*, 2011) implicam diretamente em considerar como variável de cálculo a resistividade térmica crítica (máxima) para aquele material, ou seja, no estado completamente seco.

É importante esclarecer que tais estudos obtiveram os resultados de secagem do *backfill* na região de entorno do condutor para os testes com altas potências e de longa duração.

As imagens de Figura 3.3 são fruto de ensaio de resistividade térmica do novo *backfill* fluidizado (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019). Neste caso, a sonda utilizada para o ensaio de resistividade térmica a seco em laboratório representa um modelo do cabo contornado pelo *backfill*, tendo portanto, área circular não desprezível e potência unitária dissipada de 45W/m, equivalente àquela dissipada por metro de condutor típico (ALMEIDA, ROCHA e KANASHIRO, 2019).

Figura 3. 3 - Comportamento térmico do backfill fluidizado em laboratório.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

As imagens permitem avaliar de forma qualitativa que, para as condições de ensaio e após a estabilização térmica, a região radial à distância além dos 30mm da fonte térmica já não sofre influência significativa da mesma fonte. A temperatura na região de contato com a sonda permanece abaixo dos 40°C, o que situaria a zona abaixo da isoterma crítica e, portanto, sem que ocorra migração de umidade da região de contato com o condutor para as regiões mais afastadas deste.

Neste caso, a resistividade do *backfill* a ser considerada não seria mais aquela determinada pelo material completamente seco, mas aquela determinada pelo material parcialmente seco, no ponto determinado pela umidade crítica. Em algumas situações, este ponto ainda pode ser considerado bastante conservador, haja vista que no *backfill* bimodal ele é alcançado para um teor de umidade extremamente baixo, inferior a 2%, conforme já foi apresentado na figura 2.19.

A Figura 3.4 de (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) ilustra que, a obtenção do teor de umidade em que o *backfill* apresenta resistividade de 0,65 K.m/W requer o aquecimento da amostra em estufa a 75°C por tempo superior a 30 horas, neste caso, sem a presença da fonte de umidade infinita que contornaria o material em sua aplicação *in-loco*.

Figura 3. 4 - Curva de resistividade térmica do *backfill* bimodal x tempo de secagem em estufa

Fonte: (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) adaptado.

3.4. A TRANSFORMADA CONFORME

A transformada conforme é um algoritmo matemático desenvolvido para estudar campos conservativos (aqueles que não possuem nem fontes nem sumidouros). Na mais simples interpretação os campos conservativos são estudados como “*O problema de Dirichlet*”, qual seja: “*Conheço os potenciais nas fronteiras e desejo conhecer os potenciais entre as fronteiras*”. Em seu trabalho “*Calculation of external thermal resistance of buried cable through Conformal Transformation*” sobre este algoritmo, (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972) apresentaram um resumo desta técnica para estudos de campos térmicos entre os cabos enterrados e a superfície do solo natural.

Nesta configuração a técnica de transformada conforme passa a ser também um subconjunto da topologia denominada assinatura ambiental.

A Figura 3.5 é parte do trabalho de (GAZZANA e PRIARROGGIA, 1964), usando a mesma técnica para um circuito com três cabos. Na transformação, apenas o cabo do centro é considerado energizado, portanto, emitindo calor. Esta é uma possível aproximação que visa simplificar a transformação.

Figura 3. 5 - Campos original e transformado típicos

Fonte: (GAZZANA e PRIARROGGIA, 1964) adaptado.

A seguir, serão apresentados os campos transformados com o algoritmo da transformada conforme.

Um ponto (x,y) do espaço cartesiano bidimensional que esteja em elemento de volume com simetria cilíndrica, pode ser expresso em variável complexa como:

$$x + jy = |x + jy|e^{j\theta} \quad (3.8)$$

A expressão $e^{j\theta}$ foi trabalhada por Bernoulli como

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (3.9)$$

Se:

$$y = \cos \theta + j \sin \theta \quad (3.10)$$

derivando em relação a θ vem:

$$\frac{dy}{d\theta} = -\sin \theta + j \cos \theta \quad (3.11)$$

Multiplicando e dividindo o segundo membro por j vem;

$$\frac{dy}{d\theta} = \left(\frac{1}{j}\right) (-j \sin \theta - \cos \theta) \quad , e \quad (3.12)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = \left(\frac{1}{j}\right) [-(\cos \theta + j \sin \theta)] \quad (3.13)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = \left(\frac{1}{j}\right) [-y] \quad \frac{dy}{y} = -\frac{d\theta}{j} \quad \text{então} \quad \frac{dy}{y} = j d\theta \quad \text{ou seja}$$

$$\ln y = j\theta$$

$$y = e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (3.14)$$

Esta dedução é creditada à Daniel Bernoulli.

No artigo de (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972) toda assinatura ambiental é transformada em um sistema cartesiano com variável complexa, de modo a facilitar a transformação do campo em coordenadas cilíndricas que Kennelly conjecturou ser de similitude com os campos conservativos de Maxwell e Gauss.

O algoritmo da equação 3.15 aplicado a cada ponto do domínio real transforma o campo deste domínio num campo transformado, muito mais simples de ser trabalhado quando a assinatura ambiental possui mais de um conjunto físico de materiais. Os detalhes de uso desta metodologia alternativa serão apresentados adiante.

$$Z = j \ln r - \theta \quad (3.15)$$

4. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA O CÁLCULO DA RESISTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE

A seguir será apresentada a metodologia alternativa para o cálculo da resistividade térmica equivalente do conjunto representado pelo backfill, material de reaterro e solo natural.

A metodologia alternativa objeto desta dissertação está baseada nas seguintes premissas:

- Todo ferramental de cálculo de capacidade de corrente é da IEC 60287,
- A resistência térmica do solo externo aos condutores é feita como assinatura ambiental;
- Assinatura ambiental é considerada com pelo menos três materiais circundantes do cabo;
- A resistividade térmica equivalente da assinatura será calculada através de transformada conforme.

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A metodologia de cálculo de capacidade de corrente máxima em cabos enterrados já foi apresentada anteriormente, e a equação final mais comum é:

$$I = 100 \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a - W_d(0,5T_1 + T_{2,3} + T_4 + \Delta T_4)}{10R_{ca}^{\theta_{max}}[T_1 + (1+\lambda)(T_{2,3} + T_4 + \Delta T_4)]}} \quad (4.1)$$

T_1	<i>Resistência Térmica do Dielétrico</i>
$T_{2,3}$	<i>Resistência Térmica da Capa Externa do Cabo</i>
T_4	<i>Resistência Térmica Externa do Cabo</i>
ΔT_4	<i>Resistência Térmica Externa Mútua dos Cabos</i>
θ_c	<i>Máxima Temperatura do Condutor</i>
θ_a	<i>Máxima Temperatura no Ponto Remoto do Solo</i>

W_d *Perdas Joules no Dielétrico*

$R_{ca}^{\theta_{max}}$ *Resistência Elétrica Máxima em CA*

λ *Relação Entre Perdas nas Bainhas Metálicas e Perdas no Condutor*

Todos os resultados de I_{max} em Amperes são obtidos com base nas premissas da IEC 60287.

Na metodologia alternativa o meio ambiente passa a ser a assinatura ambiental, com os materiais (*backfill* + reaterro + solo natural) sendo caracterizados termicamente com a abordagem de Gibbs para um ensemble canônico, no qual o material possui um domínio pleno do comportamento desde o estado saturado de umidade, até o estado seco.

O tratamento da transferência de calor entre o cabo e o solo é realizado admitindo que o conjunto cabo-meio encontra-se em equilíbrio termodinâmico, o que possibilita a aplicação do problema de Dirichlet.

$$Div\left(\frac{1}{\rho} Grad T\right) = 0 \quad (4.2)$$

O exemplo que segue é apresentado no trabalho de (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972) e é muito instrutivo no uso da metodologia alternativa.

Na figura 4.1, o gráfico do lado esquerdo apresenta o corte de uma vala tradicional hipotética, tomado em simetria de eixo coincidente com o centro do cabo instalado entre outros dois cabos. Esta figura é o domínio real Ω da assinatura ambiental. Os índices em vermelho são pontos de referência para facilitar a comparação entre os domínios, de forma que cada ponto no domínio real tem sua representação no domínio transformado. Nesta abordagem, a transformação considera os três cabos conduzindo corrente, ou seja, emitindo calor.

Figura 4. 1 - Três cabos diretamente enterrados mapeados com simetria de eixo.

Fonte: (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972), adaptado.

O gráfico à direita apresenta o mapa conforme, que retrata a assinatura ambiental com um campo térmico perfeito, análogo à um campo térmico de capacitor de placas planas, sem efeitos de bordo. Este domínio é denominado como domínio transformado da assinatura ambiental.

Desta forma, utilizando o recurso da transformada conforme de uma função logarítmica, pode-se verificar a efetividade do método, atribuindo resistividade térmica a cada subdomínio da transformada.

Na Figura 4.2 é apresentado o domínio real com os limites físicos dos materiais, bem como o domínio transformado no qual as diversas fronteiras de materiais e cabos são enfatizadas:

de cálculo. Nos casos reais esta fronteira pode coincidir com a parte lateral da fronteira do *backfill*.

4. A fronteira fria é retratada em azul. A interpretação desta fronteira deve ser feita como parte da assinatura ambiental, com medidas de temperatura do solo na rota de instalação dos cabos e na profundidade estimada de instalação destes.

Com as descrições do domínio transformado, torna-se possível realizar dois tipos de cálculo.

- A. A resistência térmica externa dos dois cabos (Interior e extremo) com auxílio do campo transformado. Este método de cálculo permite cada cabo apreciar a assinatura ambiental com as participações dos materiais.
- B. A resistividade térmica equivalente de todos materiais da assinatura ambiental permitindo o uso da abordagem da IEC 60287 com o benefício do desempenho termodinâmico de todos materiais. Este é o objetivo da metodologia alternativa no qual este trabalho está centrado. O uso de (A) pode ser conseguido no artigo de (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972).

O algoritmo para cálculo da resistência equivalente começa criando subdomínios no domínio transformado de modo que fique determinado a contribuição de cada material sobre cada cabo. Esta ação é feita construindo faixas verticais K_x (paralelas ao eixo y) nas fronteiras anteriormente identificadas, conforme ilustra a Figura 4.3 a seguir:

Figura 4. 3 - Divisão geométrica em faixas “K_x”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Todas as faixas verticais terão larguras que, somadas, resultarão na amplitude da abscissa dos cabos em simetria de eixo, no exemplo, 3π .

Nesta dissertação os subdomínios serão construídos com interpolação visual, no entanto, considerando os recursos computacionais disponíveis atualmente, estes poderiam ser realizados numericamente através da regra do trapézio para integração. A identificação de cada domínio dos materiais será definida com faixas horizontais L_{xy} entre as faixas verticais anteriores. Para facilitar esta identificação os segmentos de retas horizontais na Figura 4.4 foram feitas na cor laranja, formando assim o domínio numérico facilmente analisável.

Figura 4. 4 - Divisão geométrica das faixas em retângulos de largura " L_{xy} ".

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Desta forma, a metodologia alternativa pode ser enfrentada com o algoritmo da transformada conforme. Toda assinatura ambiental será concentrada em três materiais: o *backfill*, o material de reaterro e o solo natural. A Figura 4.5 a ilustra a conversão do domínio transformado (com variável complexa) em domínio numérico.

Figura 4. 5 - Domínios transformados complexo e numérico.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Desta maneira é possível avaliar como cada material “enxerga” sua contribuição específica sobre a cobertura das fontes quente e fria em termos de resistência térmica. Para cada retângulo de largura K_x (com $\sum_i K_x = 3\pi$ neste caso), a altura de cada retângulo depende da Equação 4.3, conhecida como adimensional de Kennelly:

$$-Y_1 = \frac{2\pi T_1}{\rho_0 W} = \ln \left[\frac{2P_1}{D_1} + \sqrt{\left(\frac{2P_1}{D_1} \right)^2 - 1} \right] \quad (4.3)$$

No caso $Y_1 = 8,5$

A partir da equação 4.4, pode-se calcular a contribuição dada por cada retângulo $\square$ em termos de resistência térmica local.

$$R_{largura}^{altura} = \rho_{largura}^{altura} \left(\frac{K}{L} \right)_{\square} \quad (4.4)$$

Onde:

$R_{largura}^{altura}$ Resistencia térmica do subdomínio do retângulo

$\rho_{largura}^{altura}$ Resistividade térmica do material do retângulo correspondente

L Altura do retângulo tomado na direção de Y

K Largura do retângulo tomado na direção de X

Neste sentido, realizar o cálculo da resistência térmica no domínio transformado numérico torna-se relativamente simples, a partir da analogia com a associação de resistência em série-paralelo, conforme ilustrado na Figura 4.6:

Figura 4. 6 - Modelagem da resistência térmica equivalente por analogia com associação de resistores.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A partir do valor resistência térmica equivalente, a resistividade térmica equivalente (assinatura ambiental) pode ser determinada através da aplicação da equação 4.4, isolando-se neste caso a variável “ ρ ”, tal qual na equação 4.5:

$$\rho_{largura}^{altura} = R_{largura}^{altura} \left(\frac{L}{K} \right) \quad (4.5)$$

No caso em questão o resultado em paralelo é comparado com uma resistividade térmica equivalente para um domínio de largura $K=3\pi$ e uma profundidade de Kennelly tal que $[7,75 < L < 8,50]$. A aplicação do algoritmo definido ao exemplo mencionado, considerando a resistividade térmica de todos os materiais como $\rho=1,0$ K.m/W, resultaria num valor de resistividade equivalente:

$$0,92 < \rho_{equivalente} < 1,04$$

E um valor médio de $\rho_{equivalente} = 0,98$ K.m/W, muito próximo de 1,0K.m/W como já era esperado, considerando que, igualar os valores de resistividade térmica de todos os materiais seria o equivalente a considerar todo o material ao redor dos cabos como homogêneo.

4.2. SELEÇÃO DE VALORES DE RESISTIVIDADE DOS MATERIAIS – METODOLOGIA ALTERNATIVA

A metodologia alternativa para cálculo da capacidade de condução de corrente usando o novo conceito de assinatura ambiental permite explorar aspectos de comportamento termodinâmico dos diversos componentes do solo, na resistência térmica externa ao cabo.

Ao invés de controlar as transformações de fase nas vizinhanças dos cabos, a metodologia alternativa propõe controlar apenas as funções de estado dos materiais que circundam o cabo. Este controle fica resumido apenas ao desempenho da resistividade térmica da assinatura ambiental e seus componentes nos estados: seco e saturado (com água). Qualquer outro estado que os cabos puderem acessar estará entre estes os estados seco e saturado, conforme Figura 4.7.

Figura 4. 7 - Estados limite para resistividade térmica dos materiais.

Fonte: (ALMEIDA, 2017), adaptado.

Diferentemente dos métodos usados em transferência de calor e massa em meios porosos que usam medidas de parâmetros de difusão de calor e permeabilidade de fases e matérias na modelagem, a metodologia alternativa propõe usar apenas as informações medidas sobre os materiais componentes da assinatura ambiental.

Na metodologia alternativa, conforme ilustrado anteriormente, o espaço de fases entre o estado seco e o estado saturado está sob o domínio da termodinâmica e todos seus conceitos podem ser usados. Para isso, é necessária a avaliação de cada material a ser utilizado, quais sejam, backfill, material de reaterro e solo natural ao longo de toda a extensão da linha, de forma a caracterizar os materiais, com especial atenção aos valores de resistividade térmica nos estados completamente seco e saturado. A partir do conhecimento das resistividades térmicas do material em seus estados limite seco e saturado, os demais rótulos, ilustrados pela Figura 4.8, podem ser calculados como a seguir:

1. Entre o estado seco e saturado o estado mais provável é a média aritmética entre estes dois estados limite. Este estado será rotulado como parcialmente úmido.
2. Entre os estados parcialmente úmido e o estado seco, a média será rotulada com estado parcialmente seco.
3. Entre o estado parcialmente úmido e o estado saturado, a média será rotulada como estado úmido.

Figura 4. 8 - Estados intermediários rotulados para resistividades térmicas entre estados seco e saturado.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O primeiro passo para a determinação dos valores rotulados intermediários é identificar a variação de resistividade térmica do material entre os estados completamente seco e saturado, a partir da equação 4.6:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{seco}} - \rho_{\text{saturado}} \quad (4.6)$$

A partir desta variação, determina-se o valor do espaçamento entre os rótulos a serem criados, representados pela variável “a” conforme equação 4.7:

$$a = \Delta\rho * 0,25 \quad (4.7)$$

Uma vez determinado o valor de “a”, os valores de resistividade térmica podem ser atribuídos aos rótulos criados a partir das equações 4.8, 4.9 e 4.10, a seguir:

$$\rho_{\text{úmido}} = \rho_{\text{saturado}} + a \quad (4.8)$$

$$\rho_{\text{parcialmente úmido}} = \rho_{\text{saturado}} + 2a \quad (4.9)$$

$$\rho_{\text{parcialmente seco}} = \rho_{\text{saturado}} + 3a \quad (4.10)$$

A aplicação dos rótulos aos materiais utilizados neste trabalho resulta na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Rótulos aplicados a materiais utilizados com base na metodologia deste trabalho.

Rótulo		Solo natural (típico)	Reaterro (típico)	Backfill bimodal	Backfill fluidizado
Seco (medido)	(K.m/W)	1,20	1,20	1,00	0,75
Parcialmente seco	(K.m/W)	1,01	1,01	0,86	0,67
Parcialmente úmido	(K.m/W)	0,83	0,81	0,71	0,59
Úmido	(K.m/W)	0,64	0,62	0,57	0,50
Saturado (medido)	(K.m/W)	0,45	0,42	0,42	0,42

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

4.3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

A ordem de uso do modelo numérico é:

1. Calcular as resistências térmicas de cada retângulo com a equação 4.4;
2. Associar em série as resistências de cada faixa no sentido de Y conforme Figura 4.6;
3. Associar em paralelo todas resistências calculadas em (2) – Esta é a resistência térmica entre a placa quente e a placa fria – Todo domínio térmico em torno aos cabos.
4. Calcular a resistividade equivalente, considerando o domínio X e o domínio Y com a equação 4.5. Considerando as assinaturas ambientais do capítulo, temos os seguintes resultados calculados, e demonstrados nas Tabelas 4.2 a 4.5.

Materiais com rótulo “seco”

- resistividade térmica do *backfill* (fluidizado): 0,75 K.m/W
- resistividade térmica do reaterro: 1,20 K.m/W
- resistividade térmica do solo: 1,20 K.m/W
- resistividade térmica equivalente calculada: 1,03 K.m/W

Tabela 4. 2 - Cálculo da resistividade “p” equivalente para materiais rotulados como “seco”.

Largura K ()		Altura L ()		Material	Estado	p do material (K.m/W)	Resistências térmicas parciais (K.m/W)		Resistência térmica equivalente (K.m/W)	p equivalente (K.m/W) Y min (8,50)	p equivalente (K.m/W) Y max (7,55)	p equivalent med (K.m/W)
K1	1,81	L11	4,50	Reaterro	Seco	1,20	R11	2,98	0,87	0,97	1,09	1,03
K1	1,81	L12	4,00	Backfill Fluid	Seco	0,75	R12	1,66				
K2	1,35	L21	4,15	Reaterro	Seco	1,20	R21	3,69				
K2	1,35	L22	3,40	Backfill Fluid	Seco	0,75	R22	1,89				
K3	3,55	L31	2,55	Solo natural	Seco	1,20	R31	0,86				
K3	3,55	L32	2,40	Reaterro	Seco	1,20	R32	0,81				
K3	3,55	L33	2,60	Backfill Fluid	Seco	0,75	R32	0,55				
K4	0,18	L41	4,15	Solo natural	Seco	1,20	R41	27,67				
K4	0,18	L42	1,85	Reaterro	Seco	1,20	R42	12,33				
K4	0,18	L43	1,55	Backfill Fluid	Seco	0,75	R42	6,46				
K5	1,20	L51	6,15	Solo natural	Seco	1,20	R51	6,15				
K5	1,20	L52	0,60	Reaterro	Seco	1,20	R52	0,60				
K5	1,20	L53	0,80	Backfill Fluid	Seco	0,75	R52	0,50				
K6	1,33	L61	6,15	Solo natural	Seco	1,20	R51	5,55				
K6	1,33	L62	0,85	Reaterro	Seco	1,20	R52	0,77				
K6	1,33	L63	1,50	Backfill Fluid	Seco	0,75	R52	0,85				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Materiais com rótulo “parcialmente seco”

- resistividade térmica do *backfill* (fluidizado): 0,67 K.m/W
- resistividade térmica do reaterro: 1,01 K.m/W
- resistividade térmica do solo natural: 1,01 K.m/W
- resistividade térmica equivalente calculada: 0,88 K.m/W

Tabela 4. 3 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para materiais rotulados como “parcialmente seco”.

Largura K ()		Altura L ()		Material	Estado	ρ do material (K.m/W)	Resistências térmicas parciais (K.m/W)		Resistência térmica equivalente (K.m/W)	ρ equivalente (K.m/W) Y min (8,50)	ρ equivalente (K.m/W) Y max (7,55)	ρ equivalent med (K.m/W)
K1	1,81	L11	4,50	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R11	2,50	0,75	0,83	0,93	0,88
K1	1,81	L12	4,00	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R12	1,48				
K2	1,35	L21	4,15	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R21	3,09				
K2	1,35	L22	3,40	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R22	1,68				
K3	3,55	L31	2,55	Solo natural	Parcialmente seco	1,01	R31	0,73				
K3	3,55	L32	2,40	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R32	0,68				
K3	3,55	L33	2,60	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R32	0,49				
K4	0,18	L41	4,15	Solo natural	Parcialmente seco	1,01	R41	23,34				
K4	0,18	L42	1,85	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R42	10,33				
K4	0,18	L43	1,55	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R42	5,75				
K5	1,20	L51	6,15	Solo natural	Parcialmente seco	1,01	R51	5,19				
K5	1,20	L52	0,60	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R52	0,50				
K5	1,20	L53	0,80	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R52	0,45				
K6	1,33	L61	6,15	Solo natural	Parcialmente seco	1,01	R51	4,68				
K6	1,33	L62	0,85	Reaterro	Parcialmente seco	1,01	R52	0,64				
K6	1,33	L63	1,50	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R52	0,75				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Materiais com rótulo “parcialmente úmido”

- resistividade térmica do *backfill* (fluidizado): 0,59 K.m/W
- resistividade térmica do reaterro: 0,81 K.m/W
- resistividade térmica do solo natural: 0,83 K.m/W
- resistividade térmica equivalente calculada: 0,73 K.m/W

Tabela 4. 4 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para materiais rotulados como “parcialmente úmido”.

Largura K ()		Altura L ()		Material	Estado	ρ do material (K.m/W)	Resistências térmicas parciais (K.m/W)		Resistência térmica equivalente (K.m/W)	ρ equivalente (K.m/W) Y min (8,50)	ρ equivalente (K.m/W) Y max (7,55)	ρ equivalente med (K.m/W)
K1	1,81	L11	4,50	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R11	2,01	0,62	0,68	0,77	0,73
K1	1,81	L12	4,00	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R12	1,29				
K2	1,35	L21	4,15	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R21	2,49				
K2	1,35	L22	3,40	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R22	1,47				
K3	3,55	L31	2,55	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R31	0,59				
K3	3,55	L32	2,40	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R32	0,55				
K3	3,55	L33	2,60	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R32	0,43				
K4	0,18	L41	4,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R41	19,02				
K4	0,18	L42	1,85	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R42	8,33				
K4	0,18	L43	1,55	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R42	5,04				
K5	1,20	L51	6,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R51	4,23				
K5	1,20	L52	0,60	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R52	0,41				
K5	1,20	L53	0,80	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R52	0,39				
K6	1,33	L61	6,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R51	3,81				
K6	1,33	L62	0,85	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R52	0,52				
K6	1,33	L63	1,50	Backfill Fluid	Parc. úmido	0,59	R52	0,66				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Solo natural com rótulo “parcialmente úmido”, e backfill com rótulo “parcialmente seco”

- resistividade térmica do *backfill* (fluidizado): 0,67 K.m/W
- resistividade térmica do reaterro: 0,81 K.m/W
- resistividade térmica do solo natural: 0,83 K.m/W
- resistividade térmica equivalente calculada: 0,75 K.m/W

Tabela 4. 5 - Cálculo da resistividade “ ρ ” equivalente para *backfill* rotulado como “parcialmente seco” e demais materiais como “parcialmente úmido”.

Largura K		Altura L		Material	Estado	ρ do material	Resistências térmicas parciais		Resistência térmica equivalente	ρ equivalente min (8,50)	ρ equivalente max (7,55)	ρ equivalente med
K1	1,81	L11	4,50	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R11	2,01	0,64	0,71	0,80	0,75
K1	1,81	L12	4,00	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R12	1,48				
K2	1,35	L21	4,15	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R21	2,49				
K2	1,35	L22	3,40	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R22	1,68				
K3	3,55	L31	2,55	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R31	0,59				
K3	3,55	L32	2,40	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R32	0,55				
K3	3,55	L33	2,60	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R32	0,49				
K4	0,18	L41	4,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R41	19,02				
K4	0,18	L42	1,85	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R42	8,33				
K4	0,18	L43	1,55	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R42	5,75				
K5	1,20	L51	6,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R51	4,23				
K5	1,20	L52	0,60	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R52	0,41				
K5	1,20	L53	0,80	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R52	0,45				
K6	1,33	L61	6,15	Solo natural	Parc. úmido	0,83	R51	3,81				
K6	1,33	L62	0,85	Reaterro	Parc. úmido	0,81	R52	0,52				
K6	1,33	L63	1,50	Backfill Fluid	Parcialmente seco	0,67	R52	0,75				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os exemplos apresentados nas tabelas 4.2 a 4.5 não encerram as possibilidades de combinações entre os rótulos disponíveis para cada material. A decisão sobre os rótulos a serem adotados para cada um dos materiais na ocasião da elaboração do projeto é prerrogativa de quem projeta. Considerando que a resistividade térmica dos materiais tem forte relação com o teor de umidade, tal decisão deve ser tomada com base na caracterização dos materiais e seu comportamento hidrológico em campo, considerando questões como variações de nível e volume de lençol freático, permeabilidade do solo, índices pluviométricos sazonais, entre outras.

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi apresentado um trabalho sobre uma metodologia alternativa para cálculo da capacidade de condução de corrente, em relação à norma IEC 60287, esta última usada em todos países membros do CIGRE. Nesta metodologia alternativa a parte essencial fica centrada no cálculo da resistência térmica externa, onde o meio ambiente passa a ser considerado não-homogêneo, mas em equilíbrio termodinâmico em relação à variável temperatura.

O problema de não-homogeneidade, visto como um problema de Dirichlet, foi abordado e resolvido por Luoni (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972), tendo este algoritmo sido aproveitado na metodologia alternativa proposta.

O problema do equilíbrio termodinâmico considerou dois entendimentos: (i) Entendimento de Donazzi (DONNAZZI, OCCHINI e SEPPI, 1979) e (ii) Entendimento de Brackelmann (BRACKELMANN, 1984). Donazzi entende que num volume do ambiente exterior à superfície externa do cabo, por variação da pressão parcial de vapor nos poros, surge uma fronteira onde a pressão da fase vapor dentro do volume equilibra-se com a pressão da fase líquida externa ao volume. Esta hipótese foi confirmada experimentalmente no trabalho de Bartoli e Almeida (BARTOLI e ALMEIDA, 1987). Brackelmann entende que num determinado volume exterior à superfície do cabo, ocorre a secagem do material até uma temperatura de transição considerada crítica. Após a isoterma crítica de Brackelmann o meio tem desempenho sugerido pela IEC 60287. Além de Donazzi e Brackelmann, os americanos W. Black e J. Hartley (BLACK e HARTLEY, 1985) em modelos experimentais de laboratório, observaram que o material em torno de uma sonda térmica secava o meio. A partir desta observação, desenvolveram critério de caracterização de estabilidade térmica do material do meio.

Assim, a metodologia alternativa considerou que dentro do mesmo volume, o entendimento de Donazzi é equivalente ao entendimento de Brackelmann. O volume no qual a pressão parcial de vapor, dentro do volume, é equilibrada pela pressão parcial da fase líquida fora do volume.

O tratamento discreto dos vários materiais foi decidido em medidas de laboratório, onde o parâmetro resistividade térmica varia entre um valor

suficientemente seco (maior valor) até um valor suficientemente saturado (de umidade) (BARTOLI e ALMEIDA, 1987) e (LOPES, PINHEIRO, *et al.*, 2019).

A metodologia alternativa foi construída com o algoritmo da transformada conforme (LUONI, MORELLO e HOLDUP, 1972) e as características de resistividades do backfill, materiais de reaterro dos cabos, considerando ainda o solo natural em torno da trincheira.

O domínio transformado foi discretizado em três materiais, constituindo uma assinatura ambiental (ALMEIDA, 2017).

O domínio numérico tratado com os dados dos materiais para as diversos assinaturas ambientais forneceu os resultados onde emerge a assertividade na determinação da resistividade térmica equivalente da metodologia alternativa em relação ao critério comumente utilizado de considerar a resistividade térmica equivalente como 1,0 K.m/W. Na figura 4.9 é possível verificar a variação da resistividade térmica equivalente com base nos rótulos apresentados aplicados ao exemplo utilizado neste trabalho, podendo ser comparados à prática comum.

Figura 4. 9 - Variação de resistividade térmica equivalente para os rótulos adotados.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os resultados obtidos em termos de assinatura ambiental (representada pela resistividade térmica equivalente) possuem impacto direto na capacidade de condução de corrente dos condutores. Neste sentido, a figura 4.10 apresenta a sensibilidade da ampacidade de diversas bitolas de condutor à variação de resistividade térmica equivalente:

Figura 4. 10 - Sensibilidade da ampacidade à assinatura ambiental para bitolas diversas de condutor.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

No exemplo da figura 4.11 é possível avaliar a variação da ampacidade de um condutor de 1.000mm² conforme o rótulo selecionado, instalado nas condições apresentadas na figura 4.2.

Figura 4. 11 - Variação de ampacidade para condutor de 1.000mm² em função da assinatura ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Considerando-se os valores de resistividade térmica equivalente praticados atualmente (1,0 k.m/W) e aqueles obtidos com a metodologia proposta para o meio parcialmente seco (0,88 K.m/W) , observa-se incremento na ampacidade da ordem de 4,5% para o cabo de 1.000mm² instalado nas condições citadas. Na comparação entre a prática atual (1,0K.m/W) e os valores para o meio parcialmente úmido (0,73 K.m/W) o incremento de ampacidade seria da ordem de 11% para o mesmo cabo.

5. CONCLUSÕES

O levantamento do estado da arte apresentado neste trabalho demonstra a grande diversidade de técnicas, materiais e metodologias envolvidas no dimensionamento de linhas de transmissão subterrâneas. A pesquisa realizada pelo CIGRE aqui apresentada leva à conclusão de não haver consenso nos diversos *players* ao redor do mundo acerca dos valores e critérios aplicados para a determinação de diversos parâmetros importantes no dimensionamento de condutores para linhas de transmissão subterrâneas, entre eles, a resistividade térmica do meio externo ao cabo. Sendo uma das variáveis de maior relevância para o dimensionamento, torna-se relativamente fácil inferir que a determinação precisa de seus valores, bem como a forma como esta informação é trabalhada, é de suma importância para o ótimo dimensionamento do sistema.

A mecânica do meio contínuo tem definido as abordagens atualmente acolhidas pelas normas e referências aplicáveis a esta especialidade, no entanto, a abordagem clássica permeia questões que, mesmo para os dias atuais, ainda não são totalmente compreendidas. Como regra geral para projetos de qualquer natureza, toda incerteza é interpretada como risco e imediatamente cercada de coeficientes de segurança.

Apoiada em ensaios de laboratório e vasta bibliografia de suporte, a abordagem proposta neste trabalho serve-se de elementos da mecânica estatística, uma vez que nesta abordagem o condutor de um cabo isolado para alta tensão diretamente enterrado seria *Ensemble Canônico de Gibbs*.

Os resultados obtidos nos casos apresentados são bastante precisos, sobretudo considerando a modelagem simplista realizada, utilizando-se da discretização visual do campo transformado complexo em campo transformado numérico. A aplicação de ferramentas de elevado potencial matemático elevaria de forma sensível a precisão dos cálculos.

A facilidade no emprego da metodologia também é fator de alta relevância, uma vez que, na modelagem apresentada, a parte essencial fica centrada no cálculo da resistência térmica externa, onde o meio ambiente passa a ser considerado não-homogêneo, mas em equilíbrio termodinâmico em relação à

variável temperatura. A resistividade térmica equivalente (assinatura ambiental) é determinada, por analogia, por associação série-paralela das resistências parciais calculadas no campo transformado numérico.

A aplicação de rótulos às resistividades térmicas dos materiais com base em graus de umidade previamente definidos também facilita sobremaneira a modelagem, sem colocar em risco a instalação a ser construída. O rótulo “parcialmente seco” é o que se mostrou mais razoável, tendo sido evidenciado por experiência em laboratório através da qual o *backfill* fluidizado foi submetido à influência de sonda térmica (modelo de cabo típico) com resultados que demonstram a extensão da influência térmica do cabo como fonte de calor (representado pela sonda) no meio *backfill*.

Por fim, é apresentada a relação entre ampacidade e resistividade térmica equivalente, que permite deduzir os ganhos técnicos alcançados com o uso da metodologia.

Após este trabalho e tendo em vista o aprendizado de formulação de modelos usando as bases termodinâmicas, alguns tópicos podem ser ulteriormente explorados, tais como a ampliação do uso do conceito de assinatura ambiental para caracterização das fronteiras de temperatura crítica e grau de saturação crítico, com vantagens de otimizar a geometria do *backfill*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. R. **Tecnologia para linhas de transmissão instaladas diretamente enterradas em solos sujeitos a instabilidade térmica e hidrológica. (Novos Materiais Para Backfill e Sistema de Controle de Temperatura)**. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. São Paulo. USP, 2011.

ALMEIDA, G. R. **Assinatura ambiental em linhas de transmissão subterrâneas**. Workshop - EPE. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia. 2017.

ALMEIDA, G. R.; ROCHA, R. A. B.; KANASHIRO, A. G. Escolha de Materiais e Dimensionamento de Backfill em Linhas de Transmissão Subterrânea. **XXV SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Belo Horizonte, 2019.

BARTOLI, J. R. **Transferência de calor e massa em meios porosos. Modelos físicos e matemáticos**. Pirelli. Santo André. 1986. (RT-353/106/2).

BARTOLI, J. R.; ALMEIDA, G. R. **Cabos de potência em solo parcialmente secos. Percolação de umidade em condição de campo térmico e gravitacional acoplados**. COBEM 87 - IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Florianópolis, p. 109-112. 1987.

BARTOLI, J. R.; ALMEIDA, G. R. **Cabos de potência em solos parcialmente secos - Experimentação sobre modelos estacionários**. COBEM 87 - IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Florianópolis, p. 105-108. 1987.

BATES, C.; CAIN, D.; MALMEDAL, K. **Including Soil Drying in Cable Ampacity Calculations**. IEEE Trans. Ind. appl., vol. 52, pp. 4646-4651, 2016.

BLACK, W. Z.; HARTLEY, J. G. **Thermodynamics - Solutions Manual to Accompany**. Michigan: Harper&Row, 1985.

BRACKELMANN, H. **Physical principles and calculation methods of moisture and heat transfer in cable trenches**. Berlim: Verlag ETC, 1984. ISBN Report 19.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conductions of heat in solids**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1959.

CIGRE. Current ratings of cables buried in partially dried soil Part 1: Simplified Method that can be used with minimal soil information (100% load factor). **Electra**, v. 104, p. 11-22, 1986.

CIGRE, W.-3. **Brochure. A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables.** Paris: CIGRE, v. 640, 2015.

CIGRE, W.-4. **Brochure. Long Term performance of soil and backfill systems.** Paris: CIGRE, v. 714, 2017.

DETTTER, C.; CURTIS, L.; STEWART, B. **Seattle City Light material Standard - Fluidized Thermal Backfill.** Seattle City Light. Seattle, p. 1-4. 2014. (7150.00).

DONNAZZI, F.; OCCHINI, E.; SEPPI, A. Soil thermal and hydrological characteristics in designing underground cables. [S.l.]: Proc. IEE, v. 126, 1979. p. 506-516.

FERREIRA, L. S. D. **Transferência de calor e migração de umidade em solos que envolvem cabos de potência aterrados.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1993.

FREITAS, D. S. D. **Desempenho térmico de cabos de potência subterrâneos, incluindo migração de umidade no solo e efeitos transientes.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1995.

GAZZANA, M. P.; PRIARROGGIA. The calculation of the effective external thermal resistance of cables laid in materials having different thermal resistivities. **Electra**, v. 98, p. 19-42, 1964. ISSN WG-02 SC-21.

GIBBS, J. W. **Elementary Principles in Statistical Mechanics developed with Special reference to the Rational foundations of Thermodynamics.** New York: Dover Publ. 1960.

HUSSAIN, S. **Validation of Coupled Heat and Moisture Flow Program in Unsaturated Porous Media.** MSc Dissertation - Dept of Civil Engineering, Toronto University. Toronto. 1997.

IEC. **60853 - Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.** IEC. Geneva, Switzerland. 2008.

IEC. **60287 - Electric cables – Calculation of the current rating.** IEC. Geneva, Switzerland. 2014.

KEMA, N. V.; HEIDEMIJ. **Moisture migration and drying-out in sand around heat dissipating cables and ducts.** [S.l.]: Arnheim, 1981.

KENNELLY, A. E. On the carrying capacity of electric cables, submerged, buried or suspended in air. **9th Annual Meeting Association Edison Illuminating Companies**, 1893. 79-92.

KENNELLY, A. E. **Biographical Memoir of, by Vannevar Bush**. New York: National Academy of Sciences of United States of America, v. XXII, 1940.

LOPES, J. C. R. et al. Backfill Fluidizado com Elevada Condutividade Térmica e Auto-Compactante para Sistemas Subterrâneos. **XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Belo Horizonte, 2019. ISSN GLT25-4746.

LOPES, J. C. R.; NARIMATSU, T. **Ampacidade de Cabos de Potência isolados para Linhas de Transmissão Subterrâneas de Alta Tensão**. São Paulo: VIII SNPTEE - Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1986.

LUONI, G.; MORELLO, A.; HOLDUP, W. Calculation of external thermal resistance of buried cable through Conformal Transformation. **Proc. IEE**, v. 119 nº 5, p. 575-586, 1972. ISSN Paper 6956.

MITCHELL, J. K.; KAO, T.-C.; ABDEL-HADI, O. N. **Backfill materials for underground power cables - Phase I**. Department of Civil Engineering - University of California. Berkeley. 1977. (EPRI EL-506).

NEHER, J. H.; MCGRATH, M. H. **The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems**. AIEE Transactions. [S.l.], p. 752–772. 1957. (76 (III)).

PHILIP, J. R.; VRIES, D. A. D. **Moisture movement in porous materials under temperature gradients**. [S.l.]: Transaction American Geophysician Union, 1957. 222-232 p.

PILGRIM, J. A. et al. **Impact of moisture migration on the current rating of high operating temperature cables**. Versailles, France: Jicable, 2011.

RADHAKRISHNA, H. S. Fluidized Cable Thermal Backfill. In: COMMITTEE, S. E. **Proceedings of the Symposium on Underground Cable Thermal Backfill**. Toronto: Pergamon Press Canada Ltd., 1981. p. 34-53. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025387-9.50008-7>>.

STOWE, K. **An introduction to Thermodynamics and statistical mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

VRIES, D. A. D. **Heat transfer in soils**. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1958.

VRIES, D. A. D. **Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media**. Transactions American Geophysical Union. [S.l.], p. 909-916. 1958. (39).