

**TARCISIO MISAEL DE LIMA**

**ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS  
EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO DO TIPO OIL FILLED (OF)**

**São Paulo  
2013**

**TARCISIO MISAEL DE LIMA**

**ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS  
EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO DO TIPO OIL FILLED (OF)**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração: Sistemas de  
Potência**

**Orientador: Prof. Dr. Luis Cera  
Zanetta Jr.**

**São Paulo  
2013**

**Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo,        de outubro de 2013.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Lima, Tarcisio Misael de**

**Análise de metodologias para localização de defeitos em cabos isolados de alta tensão do tipo oil filled (OF) / T.M. de Lima. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.**

**94 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.**

**1. Alta tensão 2. Cabos elétricos 3. Linhas subterrâneas de transmissão de energia elétrica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.**

## **DEDICATÓRIA**

**Para Ana Lúcia, amada esposa. Para Talita, Amanda e Pedro, amados filhos. Para Narciso e Kity, amados pais. Para Ivan e Tatiana, amados irmãos.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus em primeiro lugar, por ter me agraciado com família, saúde, paz e amigos.

À equipe de pesquisa composta pelo Aloísio, Daniel, Paulo, Cláudio, Junior, Helena, Erick e Erasmo, pelo empenho e dedicação.

A todos os amigos e colegas da CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, pela troca de experiências.

A todas as instituições de ensino que me receberam como estudante, pela oportunidade de aprendizado que me proporcionaram.

A todos os meus professores, pelo conhecimento que me transmitiram.

A todos os amigos e colegas com os quais tive contato pessoal e profissional, pelo relacionamento agradável.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por ter me recebido como aluno de mestrado.

Ao Prof. Dr. Zanetta, pela atenção e apoio durante o processo de orientação.

E, finalmente, agradeço amorosamente à minha esposa, pelo incentivo e compreensão.

**“Quem observa o vento nunca  
semeará, e o que olha para as  
nuvens nunca segará.”**

**(Eclesiastes 11.4)**

## RESUMO

Duas metodologias que podem ser utilizadas na localização de defeitos em cabos isolados de alta tensão do tipo Oil Filled (OF) foram analisadas. As metodologias descritas têm como princípio a localização de vazamentos de óleo, ou seja, todo defeito seguido de vazamento de óleo poderá ser localizado a partir das mesmas. A primeira metodologia é baseada no congelamento dos cabos OF, com a linha desenergizada, a fim de localizar vazamentos de óleo de cabos OF a partir de 300 litros por mês. A segunda metodologia é baseada na utilização de traços de gás perfluorcarbono – Perfluorocarbon Tracer (PFT), através de um sistema montado com equipamentos que permitem realizar a localização de vazamentos de óleo de cabos OF a partir de 100 litros por mês, sem a necessidade de desligamento da linha subterrânea. Esta dissertação propõe algumas melhorias na metodologia do congelamento e apresenta as primeiras experiências de utilização do PFT no Brasil para localização de vazamentos de óleo.

Palavras-chave: Cabo com papel impregnado; Vazamento de óleo; Congelamento; Traçador perfluorcarbono; Localização de falhas.

## **ABSTRACT**

Two methods that can be used to locate faults in Oil Filled (OF) cables were analyzed. The methods described have the principle of oil leak location. All defects followed by oil leakage can be located using the same. The first method is based in OF cables freezing, with the line outage, in order to locate oil leaks from 300 liters per month and above. The second method is based on the use of tracer gas - Perfluorocarbon Tracer (PFT) and devices that allow to perform the location of oil leaks from 100 liters per month, without the need of underground line outage. This paper proposes some improvements for the freezing method and presents the first experiments in Brazil using PFT to locate oil leakage.

**Keywords:** Paper impregnated cable; Oil leakage; Freeze; Perfluorocarbon tracer; Leak location.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cabo tipo Pipe.....	21
Figura 2 – Cabo tipo OF.....	22
Figura 3 – Modelo de circuito térmico para a câmara de congelamento.....	22
Figura 4 – Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 1 m de comprimento.....	24
Figura 5 - Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 2 m de comprimento.....	24
Figura 6 - Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 3 m de comprimento.....	25
Figura 7 – Dependência da $\tan \delta$ de um cabo 275 kV com 44 m de comprimento com a temperatura da câmara de congelamento de 1 m.....	26
Figura 8 - Modelo teórico para cabo OF.....	27
Figura 9 – Modelo para cabo OF com blindagem metálica de alumínio.....	30
Figura 10 – Modelo para cabo OF com blindagem metálica de chumbo. ....	30
Figura 11 – Demonstração do modelo teórico.....	31
Figura 12 - Simulador para cálculo de tempo de congelamento. ....	34
Figura 13 – Tempo para congelamento de cabo OF de 138 kV com blindagem metálica de alumínio.....	36
Figura 14 – Tempo para congelamento de cabo OF de 138 kV com blindagem metálica de chumbo. ....	36
Figura 15 – Tempo para congelamento de cabo OF de 230 kV com blindagem metálica de alumínio.....	37
Figura 16 – Tempo para congelamento de cabo OF de 230 kV com blindagem metálica de chumbo. ....	37
Figura 17 – Tempo para congelamento de cabo OF de 345 kV com blindagem metálica de alumínio.....	38
Figura 18 – Tempo para congelamento de cabo OF de 345 kV com blindagem metálica de chumbo. ....	38
Figura 19 – Comparação entre tempos de congelamento calculados e medidos. ....	42
Figura 20 – Características do composto Perfluor 1,3-dimetilciclohexano. ....	49
Figura 21 – Dispositivo para injeção de PFC em tanque de óleo.....	51

Figura 22 - Montagem hidráulica para injeção da mistura LAB+PFC nos cabos. ....	53
Figura 23 – Sistema de injeção do PFC no cabo OF. ....	57
Figura 24 – Sistema de injeção do PFC no óleo LAB.. ....	58
Figura 25 - Concentração de PFC presente no óleo do tanque pressurizado.....	59
Figura 26 - Buraco no solo para simulação de vazamento. ....	60
Figura 27 - Adaptação para continuidade na simulação de vazamento. ....	61
Figura 28 - Croqui dos pontos de coleta de amostra no solo. ....	61
Figura 29 - Croqui dos pontos de coleta de amostra no ar. ....	61
Figura 30 - Coleta de PFC no ar. ....	62
Figura 31 - Coleta de PFC no solo. ....	62
Figura 32 - Quantificação de PFC no ar.....	64
Figura 33 - Quantificação de PFC no solo. ....	64
Figura 34 - Protótipo contendo 30 m de cabo OF e 2 terminais de 345 kV.....	65
Figura 35 – Primeiro congelamento da linha XAV-BAN (22/11/2008).....	76
Figura 36 – Segundo congelamento da linha XAV-BAN (23/11/2008).....	77
Figura 37 – Terceiro congelamento da linha XAV-BAN (23/11/2008).....	77
Figura 38 - Quarto congelamento da linha XAV-BAN (01/05/2010). ....	78
Figura 39 - Quinto congelamento da linha XAV-BAN (02/05/2010).....	79
Figura 40 – Bomba de amostragem de ar de baixa vazão.....	80
Figura 41 - Calibrador para bomba de amostragem de ar de baixa vazão.. ....	80
Figura 42 -Cromatógrafo gasoso com detector ECD. ....	80
Figura 43 - Dessorvedor térmico.....	81
Figura 44 - Fonte Ressonante Móvel de 800 kV. ....	82
Figura 45 - Painel de controle da fonte ressonante.....	82
Figura 46– Diagrama de blocos do teste de tensão aplicada.....	82
Figura 47 - Divisor capacitivo e reatores utilizados na prova de tensão aplicada. ....	83
Figura 48 – Sinalização do ambiente de trabalho. ....	84
Figura 49 – Fluxímetros digitais. ....	84
Figura 50 – Notebook com software de aquisição de dados.....	84
Figura 51 – Escavação para acesso ao cabo subterrâneo. ....	85
Figura 52 – Preparação do cabo para congelamento. ....	85
Figura 53 – Colocação de nitrogênio líquido na câmara de congelamento.....	85
Figura 54 – Cabo congelado. ....	86
Figura 55 - Aplicação de fitas após o congelamento.....	86

Figura 56 – Compactação de areia média lavada em vala. ....	87
Figura 57 – Compactação de terra em vala. ....	87
Figura 58 – Colocação de bica corrida em vala. ....	87
Figura 59 – Reconstituição do asfalto. ....	88
Figura 60 – Reconstituição da pintura da via. ....	88
Figura 61 - Local onde o protótipo foi montado. ....	89
Figura 62 - Fixação de torre metálica. ....	89
Figura 63 - Cabo posicionado. ....	90
Figura 64 - Preparação de materiais para montagem do terminal. ....	90
Figura 65 - Início de aplicação dos papéis. ....	90
Figura 66 - Aplicação dos últimos papéis. ....	91
Figura 67 - Posicionamento do cone defletor de campo. ....	91
Figura 68 - Papéis abaixo do cone defletor de campo sendo preparados. ....	91
Figura 69 - Papéis acima do cone defletor de campo sendo preparados. ....	92
Figura 70 - Preparação da ponta do cabo. ....	92
Figura 71 - Conector fixado no condutor de cobre ....	92
Figura 72 - Ponta do cabo recebendo banho de óleo LAB. ....	93
Figura 73 - Cone defletor finalizado recebendo banho de óleo LAB. ....	93
Figura 74 - Porcelana sendo levada até a base do terminal. ....	94
Figura 75 – Protótipo montado. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para cálculo de tempo de congelamento. ....	28
Tabela 2 - Comparação entre tempos medidos em campo (Real) e tempos extraídos das curvas de aplicação (Simulado).....	41
Tabela 3– Resultados de ensaios em soluções de PFC em óleo LAB.....	58
Tabela 4 - Resultados das amostras analisadas na Environ.....	63
Tabela 5 – Resultados da prova de tensão aplicada em protótipo de cabo OF. ....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCBDA	- Canadian Copper and Brass Development Association
CFC	- Clorofluorcarbono
CG	- Cromatografia Gasosa
CTEEP	- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DDB	- Dodecilbenzeno
DLAB	-Densidade do óleo LAB (kg/l)
DPFC	- Densidade do PFC (kg/l)
DTA	- Dual Trap Analyser
ECD	- Electron Capture Detector
EPA	- Environmental Protection Agency
EPRI	- Electric Power Research Institute
FID	- Flame Ionization Detector
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	- International Organization for Standardization
kV	- Quilo Volt
LAB	- Linear Alquilbenzeno
LPFFC	- Low Pressure Fluid Filled Cable
OF	- Oil Filled
OFC	- Oil Filled Cable
PDMC	- Perfluorcarbono 1,3-dimetilciclohexano
PFC	- Perfluorcarbono
PFT	- Perfluorocarbon Tracer
PPMPFC	- Parte por Milhão de PFC (m/m)
RGP	- Residual Gas Pressure
SCOFC	- Self Contained Oil Filled Cable
SF6	- Hexafluoreto de Enxofre
VLAB	- Volume de óleo LAB (l)
VPFC	- Volume de PFC (l)

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Cálculo da temperatura do óleo no núcleo do cabo Pipe.....	23
Equação 2.2 - Cálculo de $t$ - Tempo necessário para congelamento total do óleo.....	31
Equação 2.3 - Cálculo de $R_1$ - Resistência térmica entre o duto central e a superfície do cabo OF com blindagem de alumínio .....	32
Equação 2.4 - Cálculo de $k$ - Condutividade térmica média do cabo OF .....	33
Equação 2.5 - Cálculo de $R_2$ - Resistência entre o centro e o fim da câmara de congelamento.....	33
Equação 2.6 - Cálculo de $Q$ - Fluxo vazante .....	33
Equação 2.7 - Cálculo de $w$ - Calor transportado pelo fluxo de óleo.....	33
Equação 2.8 - Cálculo de $C_{total}$ - Capacitância térmica total do cabo e do fluxo vazante de óleo .....	34
Equação 3.1 - Cálculo do volume de PFC a ser misturado com óleo .....	50
Equação 3.2 - Cálculo da massa de PFC a ser misturado com óleo .....	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>MÉTODO DO CONGELAMENTO</b>	<b>20</b>
2.1	Estado da arte - método do congelamento	20
2.1.1	Aspectos gerais	20
2.1.2	Modelo teórico	22
2.1.3	Comportamento da $\tan \delta$	25
2.2	Proposta - método do congelamento	27
2.2.1	Modelo teórico	27
2.2.1.1	Modelo teórico para congelamento de cabo OF – Oil Filled com blindagem metálica de alumínio	30
2.2.1.2	Modelo teórico para congelamento de cabo OF – Oil Filled com blindagem metálica de chumbo	30
2.2.2	Formulação matemática	31
2.2.3	Curvas de aplicação	34
2.3	Ensaio experimentais - método do congelamento	39
2.4	Discussões - método do congelamento	42
<b>3</b>	<b>MÉTODO DO PFT</b>	<b>45</b>
3.1	Estado da arte - método do PFT	45
3.1.1	Aspectos gerais	45
3.1.2	Perfluorcarbonos	46
3.1.3	Uso do PFC	46
3.2	Proposta - método do PFT	49
3.2.1	Obtenção da mistura LAB+PFC	50
3.2.2	Injeção da mistura LAB+PFC nos Cabos	52
3.2.3	Coleta do ar	53
3.2.4	Metodologia de análise	54
3.2.5	Procedimento para localização do vazamento	55
3.3	Ensaio experimentais - método do PFT	57
3.3.1	Ensaio físico-químico das soluções de perfluorcarbono (PFC) em óleo linear alquilbenzeno (LAB)	57
3.3.2	Medições de PFC em amostras de óleo LAB	58

3.3.3	Medições de PFC em amostras de ar.....	60
3.3.4	Teste de tensão aplicada em protótipo.....	65
3.4	Discussões - método do PFT.....	66
4	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	69
4.1	Conclusões.....	69
4.2	Perspectivas futuras.....	70
	REFERÊNCIAS.....	72
	ANEXOS.....	75
1	Registro dos congelamentos.....	76
2	Equipamentos utilizados no método do PFT .....	80
3	Ensaio de tensão aplicada no protótipo de 345 kV.....	82
4	Fotos demonstrando as etapas de um congelamento. ....	84
5	Fotos da montagem do protótipo para teste de tensão aplicada. ....	89

## 1 INTRODUÇÃO

Os cabos isolados em papel e óleo para alta tensão, são denominados no Brasil de Cabos Oil Filled (OF), ou seja, Cabos Óleo Fluido, e internacionalmente de Oil Filled Cable (OFC), nome inicial, e Self Contained Oil Filled Cable (SCOFC) ou Low Pressure Fluid Filled Cable (LPFFC) ou, eventualmente, outros nomes.

O cabo OF foi patenteado pelo Italiano Luigi Emanuelli, em 1917 e as principais características deste tipo de cabo são: condutor com um duto central para circulação de óleo isolante, isolamento em papel selecionado pela sua gramatura e tipo de fibras mais longas, impregnado com óleo mineral desgaseificado de baixa viscosidade, contido dentro de uma blindagem metálica extrudada de alumínio ou chumbo. O cabo isolado com papel impregnado em óleo impossibilita a formação de espaços vazios e consequentes descargas parciais em seu interior.

Este tipo de cabo transporta energia elétrica no Brasil nas tensões de operação: 69, 88,138, 230 e 345 kV.

Cidades como São Paulo, Rio de Janeiro, Cubatão, Belo Horizonte e Camaçari, entre outras, possuem cabos OF instalados em operação.

Por motivos diversos como corrosão por correntes parasitas, danos causados por terceiros, movimentações devidas a variações de temperaturas e vibrações, entre outros, a integridade da blindagem metálica extrudada pode ficar comprometida e causar perdas de óleo para o ambiente.

Estas perdas podem ser pequenas como um litro dia até alguns litros dia ou grandes, podendo levar à necessidade de desligamento imediato da linha. No primeiro caso a linha não necessita de um desligamento imediato, podendo ser programado esse desligamento, mas a localização do vazamento deve ser efetuada com a maior brevidade possível.

Até o início da década de 80, no Brasil os cabos OF eram preenchidos com óleo Dodecilbenzeno (DDB), que não era biodegradável. Depois foi adotado o Linear Alquilbenzeno (LAB), quando o mesmo começou a ser produzido no Brasil.

Apesar do óleo LAB ser biodegradável, por questões ambientais os vazamentos devem ser localizados e corrigidos rapidamente.

Hoje as localizações no Brasil são feitas basicamente pelo processo de vazão (pré-localização) completada pelo processo de congelamento.

Na pré-localização são utilizados fluxímetros para medir os fluxos de óleo dentro do cabo com vazamento e de um cabo em perfeitas condições. Com os resultados das medições e com os valores dos comprimentos dos cabos, são realizados cálculos a fim de estimar a distância entre os pontos de medição dos fluxos de óleo e o ponto onde se encontra o vazamento. Este método possui erro de aproximadamente 20% em relação ao comprimento do cabo (GRIMONI, J. A. B., et al., 2009).

O processo de congelamento é realizado com o cabo desenergizado como complemento da pré-localização. Este processo consiste em abrir valas na rua descobrindo o cabo para poder realizar o congelamento com nitrogênio líquido. São instalados fluxímetros nas duas extremidades do cabo com vazamento a fim de monitorar os fluxos de óleo e, após escolher o ponto do cabo a ser congelado, é aberta uma vala para instalação de caixas de isopor no cabo, as quais são enchidas com o nitrogênio líquido. Quando o cabo está congelado ocorre alteração nos fluxos de óleo monitorados nas extremidades do mesmo, de forma que é possível concluir em qual lado do cabo, em relação ao ponto de congelamento, está o vazamento. Este método permite localizar vazamentos de óleo a partir de 300 litros por mês, porém é muito dispendioso e interfere fortemente nas áreas de trânsito.

O segundo método analisado nesta dissertação já está sendo utilizado nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, como a Inglaterra, trata-se da detecção de traços de gás perfluorcarbono e pode ser realizado com o cabo energizado e consiste em misturar um produto químico no óleo do cabo, o qual é liberado no solo junto ao óleo na ocorrência de vazamentos. Após evaporar, este produto pode ser detectado no ar e no solo onde ocorreu o vazamento.

Este método permite localizar vazamentos de óleo a partir de 100 litros por mês e reduz a quantidade de escavações nas ruas.

As duas metodologias analisadas nesta dissertação são complementares, de forma que a do congelamento total dos cabos pode ser melhorada e o método de traços de gás Perfluorocarbon Tracer (PFT) pode ser implementado no Brasil.

O capítulo 2 trata do método do congelamento, indicando o estado da arte, a proposta de um modelo teórico que possibilita o cálculo prévio do tempo de congelamento, os testes realizados na pesquisa e as discussões.

O capítulo 3 trata do método do PFT, indicando o estado da arte, a proposta para utilização deste método no Brasil, os testes realizados na pesquisa e as discussões.

## **2 MÉTODO DO CONGELAMENTO**

### **2.1 Estado da arte - método do congelamento**

Inicialmente, foram buscados artigos para levantar informações sobre o uso de métodos físicos na localização de vazamentos de óleo em cabos subterrâneos.

Os trabalhos e artigos foram levantados em publicações do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), dentre outras fontes.

#### **2.1.1 Aspectos gerais**

Um dos métodos de localização de fuga de óleo em cabos do tipo “Self Contained Oil filled Cable”, cabo OF ou em “High Pressure Oil filled Cable”, cabo Pipe, mais utilizados ao longo de anos foi o do congelamento total, ou seja, congelar o óleo do cabo de modo a dividir o trecho em estudo em duas seções distintas hidráulicamente para se saber de que lado o vazamento ocorre. Normalmente o uso desse método é precedido por uma pré-localização, como por exemplo, utilizando o método dos fluxômetros.

Os resultados dos primeiros testes de congelamento foram publicados por (MERRELL, E. J., 1955) e foram realizados em cabos do tipo Pipe num ambiente controlado. Nessa ocasião, os materiais criogênicos utilizados foram: gelo seco, acetona e cloreto de metileno.

Uma câmara de congelamento simples e eficiente para uso em cabos do tipo Pipe foi indicada por (SHORT, C. M.; BEST, R. J., 1968), assim como a utilização do material criogênico: nitrogênio líquido.

O comportamento em temperaturas criogênicas de alguns tipos de óleo isolante para cabos do tipo Pipe foi relatado por (HALL, R. E.; CHEVRAY, R., 1975).

No processo de congelamento a viscosidade do óleo dentro do cabo aumenta com a redução da temperatura, de forma que os óleos utilizados em cabos Pipe congelam na temperatura em torno de  $-70^{\circ}\text{C}$ . Exemplo: (Polibuteno LV25E).

O nitrogênio líquido tem sido considerado o melhor material para congelar cabos com óleo fluido, tanto pela temperatura que se apresenta como pela facilidade de sua aquisição.

(ICHIYANAGI, N. et al, 1979) faz um estudo detalhado para as condições de congelamento para cabos Pipe, mas que pode ser adaptado para os cabos OF.

Deve-se lembrar que os cabos Pipe, Figura 1, são formados por um cabo isolado em papel em que as veias são triplexadas e instaladas dentro de um tubo de aço. Esse tubo é tratado com vácuo e cheio com óleo desgaseificado. O óleo circula no espaço entre as veias dos cabos e o tubo, pressurizado com bombas, para manter a pressão da ordem de 14 bar.



Figura 1 – Cabo tipo Pipe. Fonte:CCBDA, 2011.

Para o congelamento, as bombas são desligadas e a pressão dos tanques reserva é controlada para que a vazão, devido a vazamentos de óleo, permita o seu congelamento.

Já nos cabos OF, Figura 2, o óleo circula no canal central do condutor e a pressão é mantida por tanques de pressão variável. A pressão nesses tanques também pode ser controlada para reduzir o vazamento de óleo no cabo.



Figura 2 – Cabo tipo OF. Fonte:CCBDA, 2011.

Foi desenvolvida uma análise teórica do congelamento do óleo dentro de um cabo Pipe. Tal análise serve também para entender o mecanismo de congelamento do óleo no cabo OF.

### 2.1.2 Modelo teórico

Na Figura 3 é mostrado o modelo do circuito térmico para a câmara de congelamento utilizada no cabo Pipe.

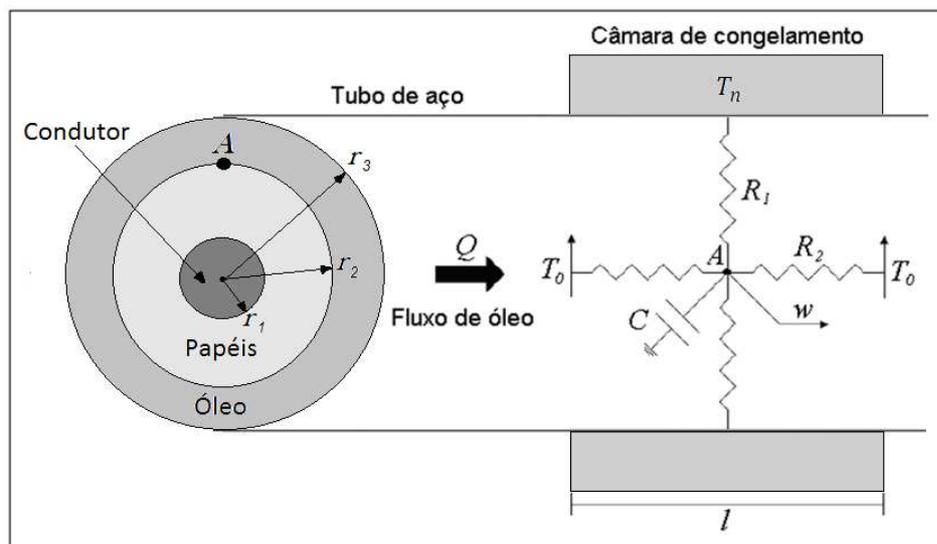


Figura 3 – Modelo de circuito térmico para a câmara de congelamento. Fonte: Adaptado de ICHIYANAGI, N. et al, 1979.

A Equação 2.1 representa a solução final para a temperatura no núcleo do cabo no centro do conjunto de resfriamento.

$$T = T_0 + \frac{(T_n - T_0 - R_1 w)}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \times \left[1 - e^{-t \left(\frac{1}{R_1 C}\right) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}\right] \quad (2.1)$$

Os símbolos utilizados nos cálculos são:

$T_n$  - Temperatura da superfície do tubo sob a câmara de congelamento

$T_0$  - Temperatura inicial do óleo

$T$  - Temperatura do óleo no núcleo do cabo no centro do conjunto de congelamento (ponto A)

$R_1$  - Resistência térmica entre o tubo e o núcleo do cabo

$R_2$  - Resistência térmica entre o centro e o final do conjunto de congelamento

$C$  - Capacitância térmica do cabo e do óleo para o conjunto de congelamento

$Q$  - Vazão do óleo

$r_1$  - Raio do condutor equivalente do cabo triplexado

$r_2$  - Raio do condutor equivalente adicionado dos papéis do cabo triplexado

$r_3$  - Raio do tubo

$l$  - Comprimento da câmara de congelamento

$w$  - Calor retirado pelo óleo

$t$  - Tempo

Com essa equação e mais algumas considerações que são apresentadas por (ICHIYANAGI, N. et al, 1979), podem ser calculadas as relações entre o tempo de congelamento, fluxo inicial de fuga de óleo, temperatura inicial do óleo e comprimento do conjunto de congelamento. As Figuras 4, 5 e 6 demonstram essas relações para um cabo Pipe com diâmetro 250 mm.

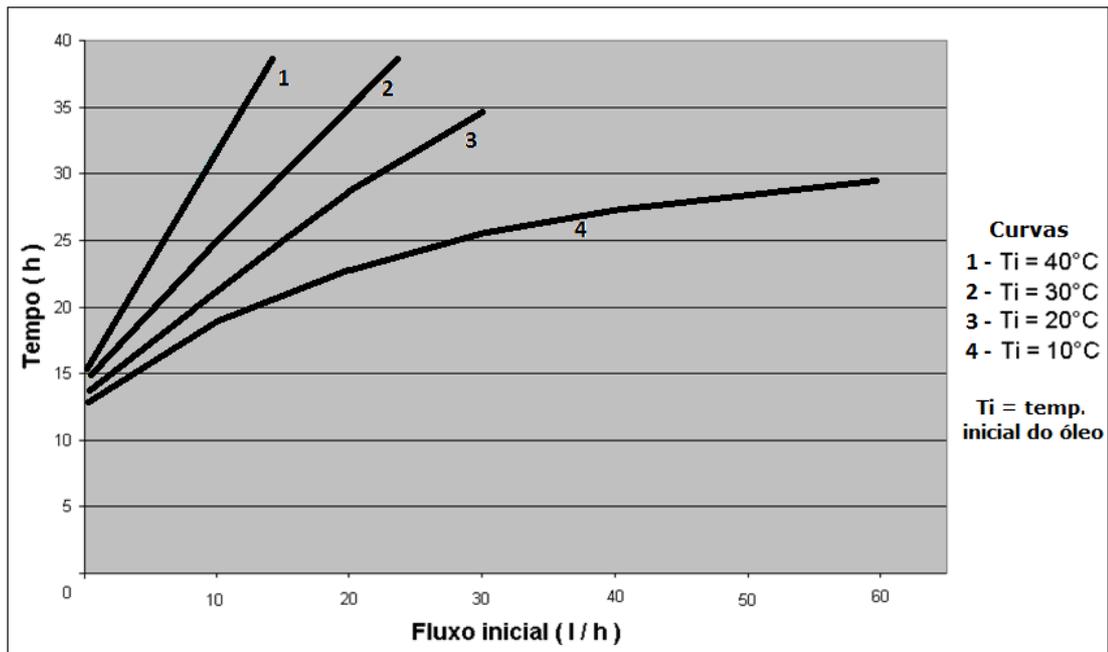


Figura 4 – Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 1 m de comprimento. Fonte: Adaptado de ICHIYANAGI, N. et al, 1979.

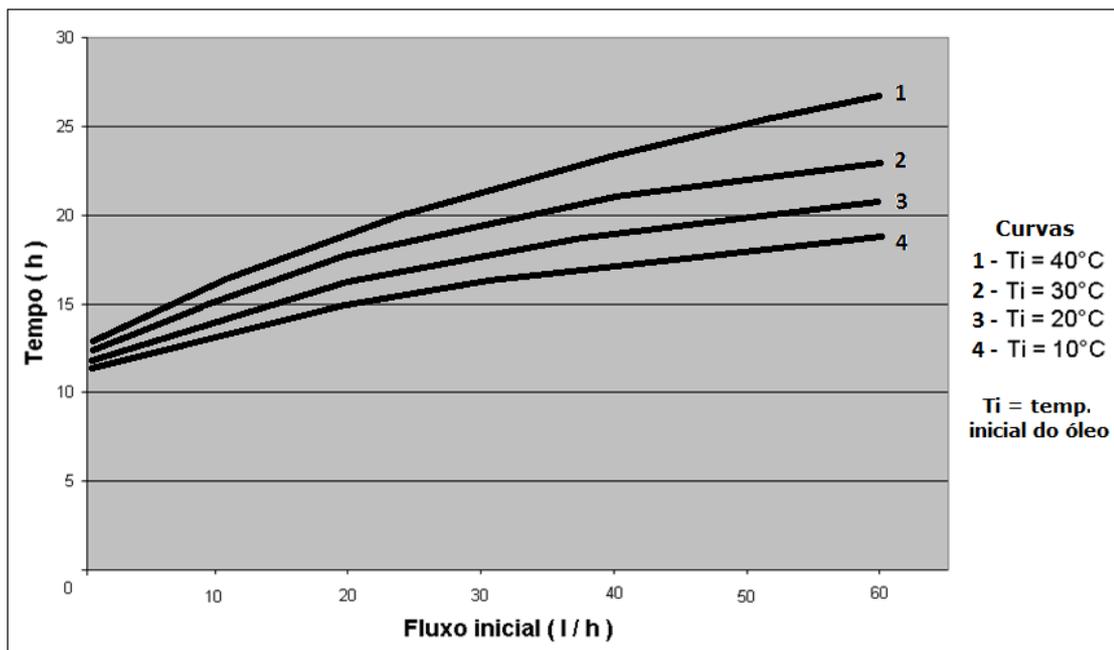


Figura 5 - Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 2 m de comprimento. Fonte: Adaptado de ICHIYANAGI, N. et al, 1979.

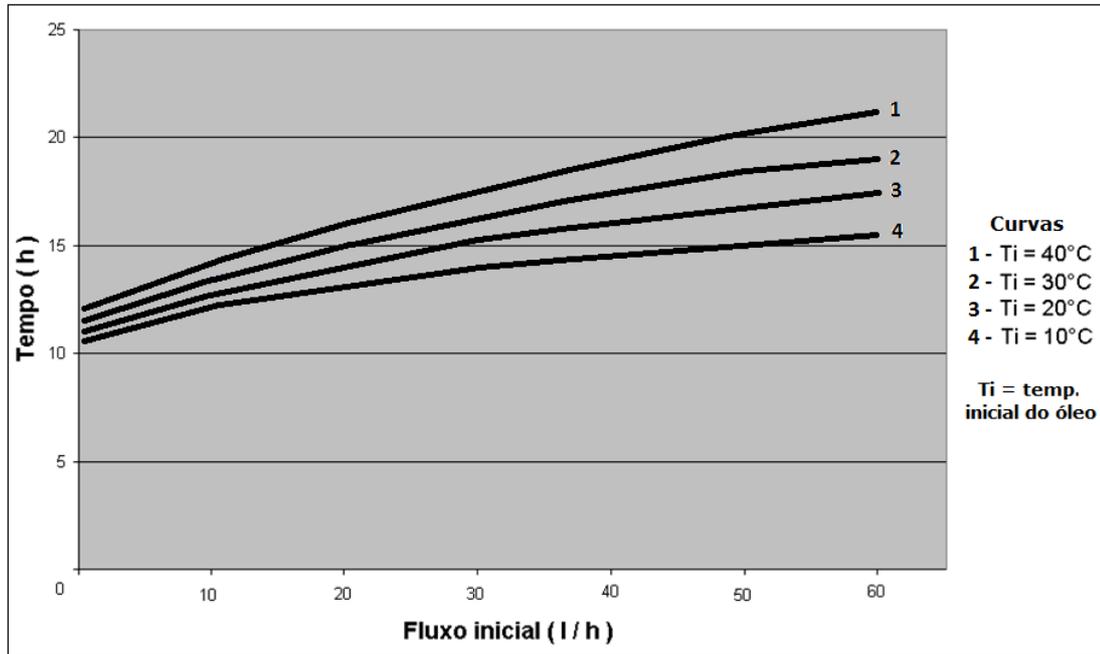


Figura 6 - Tempo de congelamento em função do fluxo inicial de óleo para uma câmara de congelamento de 3 m de comprimento. Fonte: Adaptado de ICHIYANAGI, N. et al, 1979.

Algumas conclusões que podem ser tiradas desses gráficos são as seguintes: Com um conjunto de congelamento de 1 m de comprimento não será possível congelar vazões maiores que 40 l/h em temperaturas iniciais acima de 20 °C. Com 2 m de comprimento se consegue congelar vazões de 60 l/h e temperaturas de 40 °C. Com 3 m se ganha muito pouco em relação a 2 m e não compensaria as dificuldades criadas em obra.

### 2.1.3 Comportamento da $\tan \delta$

Outro fator estudado de importância fundamental é o comportamento da  $\tan \delta$ , ou seja, o fator entre as perdas ativas e reativas na isolação papel+óleo do cabo em função da temperatura imposta. A Figura 7 mostra que a  $\tan \delta$  atinge seu maior valor quando o óleo atinge seu ponto de congelamento, ou seja, cerca de 2 vezes maior que na temperatura ambiente.

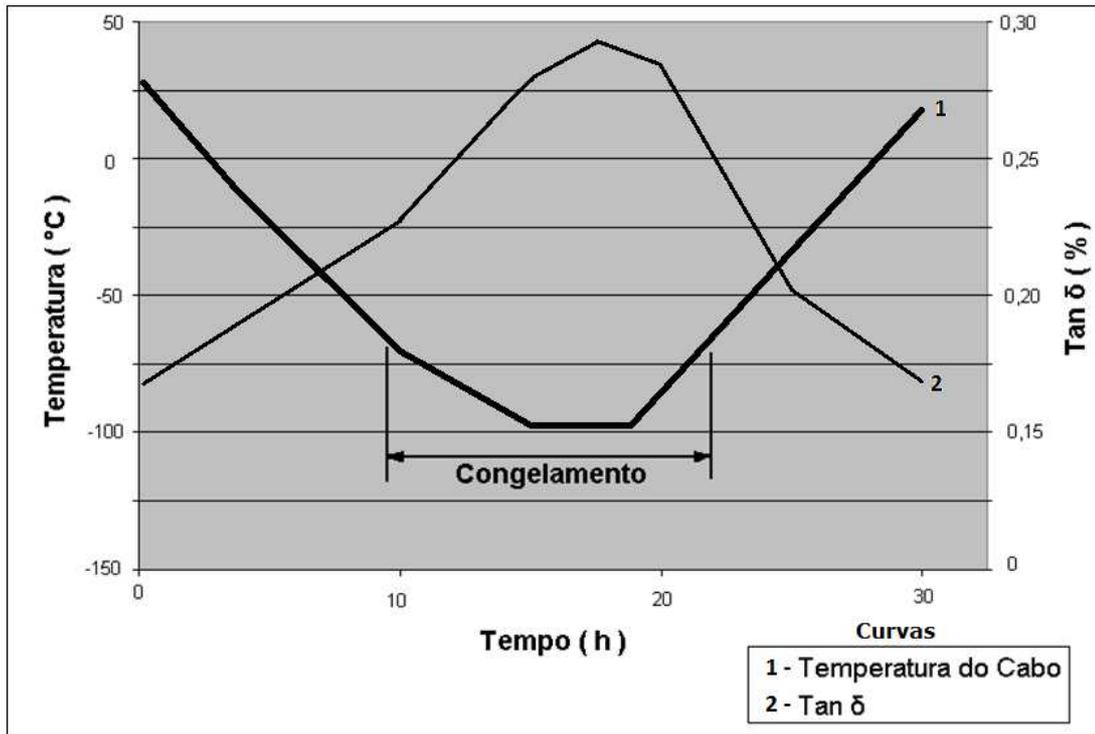


Figura 7 – Dependência da  $\tan \delta$  de um cabo 275 kV com 44 m de comprimento com a temperatura da câmara de congelamento de 1 m. Fonte: Adaptado de ICHIYANAGI, N. et al, 1979.

Isso elevaria substancialmente as perdas do cabo, se nesse instante ele estivesse sob tensão. Nos cabos de 230 kV e acima, as perdas dielétricas nas temperaturas de operação já são consideradas. Por exemplo, num cabo OF 230 kV as perdas dielétricas poderiam chegar a cerca de 5 W/m. Se o cabo estiver em operação durante o congelamento essas perdas poderiam chegar a 12 W/m, que representaria pelo menos 50% das perdas no condutor, impossibilitando o congelamento do óleo no cabo.

Todavia após o cabo retornar à temperatura ambiente, a  $\tan \delta$  também retorna a seu valor original. Com isso se o cabo for congelado sem tensão não haverá nenhum efeito devido a  $\tan \delta$ . Ainda na pesquisa de (ICHIYANAGI, N. et al, 1979), foi comprovado que características tais como  $\tan \delta$ , rigidez dielétrica e características físicas não apresentaram deterioração após o cabo retornar a temperatura ambiente.

## 2.2 Proposta - método do congelamento

A proposta demonstrada a seguir é uma adaptação do modelo de congelamento do cabo “Pipe” para o cabo “OF”.

### 2.2.1 Modelo teórico

Com base no artigo de (ICHIYANAGI, N. et al, 1979) foi feito o estudo com a intenção de calcular o tempo necessário para que o óleo do cabo ficasse com um ponto completamente congelado, a fim de interromper completamente o circuito hidráulico, possibilitando assim indicar o lado com vazamento.

Para que as análises a seguir fossem realizadas, foi utilizado o modelo teórico apresentado na Figura 8:

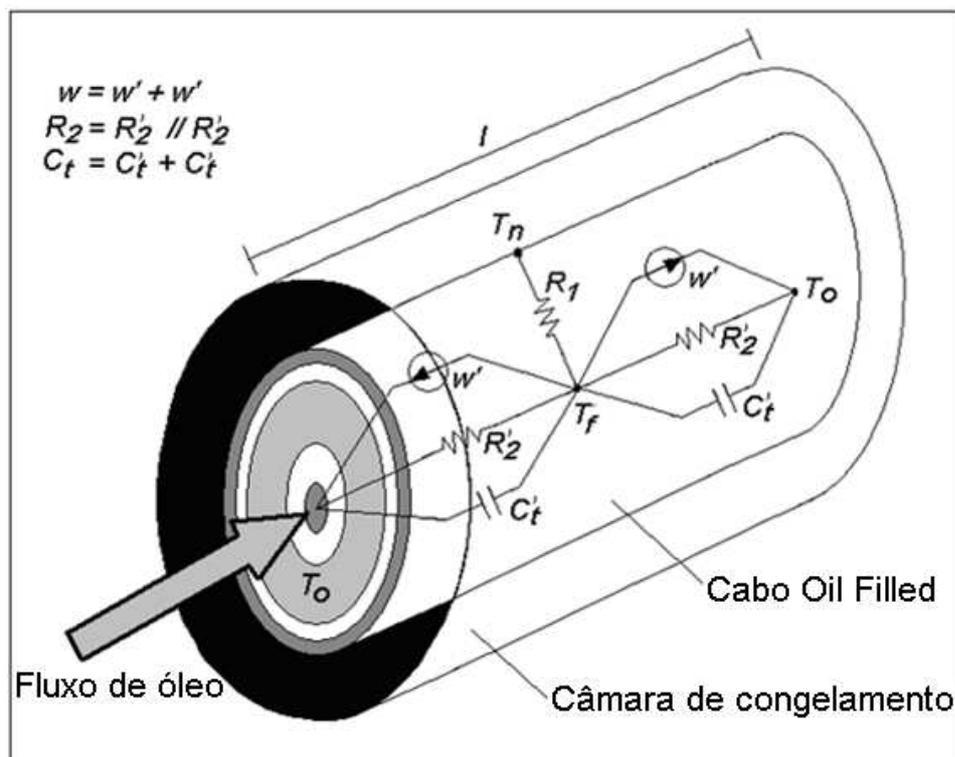


Figura 8 - Modelo teórico para cabo OF.

Tendo como base este modelo teórico indicado na Figura 8, foi possível adaptar as equações dos cabos “Pipe” para os cabos “OF”.

As variáveis utilizadas nas equações matemáticas para cálculo do tempo de congelamento de um cabo “OF” estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para cálculo de tempo de congelamento.

Variável	Unidade	Descrição
$T_f$	°C	Temperatura de congelamento do óleo
$T_0$	°C	Temperatura inicial do óleo no cabo
$T_n$	°C	Temperatura na câmara de congelamento
$\pi$	u	Número adimensional ( $\pi$ )
$e$	u	Número adimensional (e)
$l$	cm	Comprimento da câmara de congelamento
$F_v$	l/h	Fluxo de óleo no ponto de congelamento
$L_f$	cal/g	Calor latente de solidificação do óleo
$R_1$	°C/W	Resistência térmica entre o duto central e a superfície do cabo
$R_2$	°C/W	Resistência entre o centro e o fim da câmara de congelamento
$w$	W/s	Calor transportado pelo fluxo de óleo
$k$	W/cm.°C	Condutividade térmica média do cabo
$Q$	cm <sup>3</sup> /s	Fluxo de óleo no ponto de congelamento
$C_{total}$	J/°C	Capacitância térmica total do cabo e do fluxo vazante de óleo
$t$	s	Tempo necessário para congelamento total do óleo
$k_1$	W/cm.°C	Condutividade térmica do óleo
$k_2$	W/cm.°C	Condutividade térmica do condutor
$k_3$	W/cm.°C	Condutividade térmica dos papéis
$k_4$	W/cm.°C	Condutividade térmica do óleo

"continua"

“continuação”

$k_5$	W/cm.°C	Condutividade térmica da blindagem metálica
$k_6$	W/cm.°C	Condutividade térmica da capa externa
$r_1$	cm	Raio do duto central do cabo
$r_2$	cm	Raio externo do condutor
$r_3$	cm	Raio externo dos papéis
$r_4$	cm	Raio médio interno da blindagem metálica
$r_5$	cm	Raio médio externo da blindagem metálica
$r_6$	cm	Raio externo da capa externa
$C_1$	J/g.°C	Calor específico do óleo
$C_2$	J/g.°C	Calor específico do condutor
$C_3$	J/g.°C	Calor específico dos papéis
$C_4$	J/g.°C	Calor específico do óleo
$C_5$	J/g.°C	Calor específico da blindagem metálica
$C_6$	J/g.°C	Calor específico da capa externa
$\rho_1$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade do óleo
$\rho_2$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade do condutor
$\rho_3$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade dos papéis
$\rho_4$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade do óleo
$\rho_5$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade da blindagem metálica
$\rho_6$	g/cm <sup>3</sup>	Densidade da capa externa

---

### 2.2.1.1 Modelo teórico para congelamento de cabo OF – Oil Filled com blindagem metálica de alumínio

As variáveis utilizadas nas equações matemáticas para cálculo do tempo de congelamento de um cabo com blindagem metálica de alumínio estão indicadas na Figura 9 e Tabela 1.

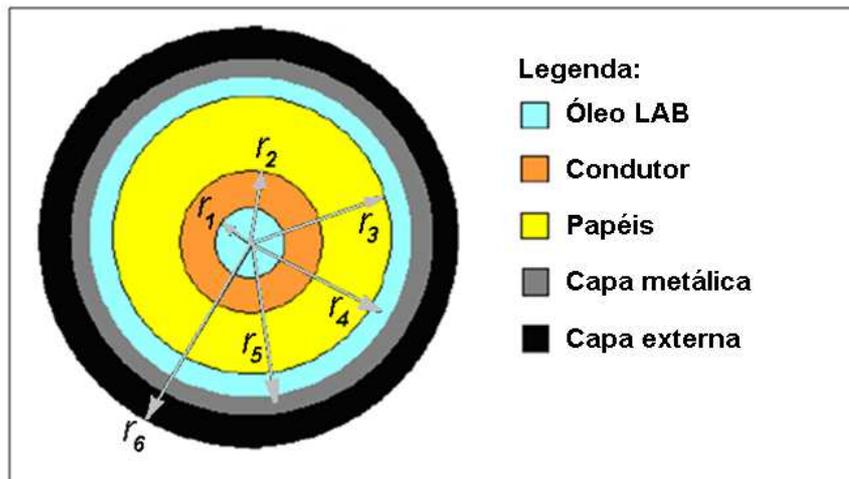


Figura 9 – Modelo para cabo OF com blindagem metálica de alumínio.

### 2.2.1.2 Modelo teórico para congelamento de cabo OF – Oil Filled com blindagem metálica de chumbo

As variáveis utilizadas nas equações matemáticas para cálculo do tempo de congelamento de um cabo com blindagem metálica de chumbo estão indicadas na Figura 10 e Tabela 1.

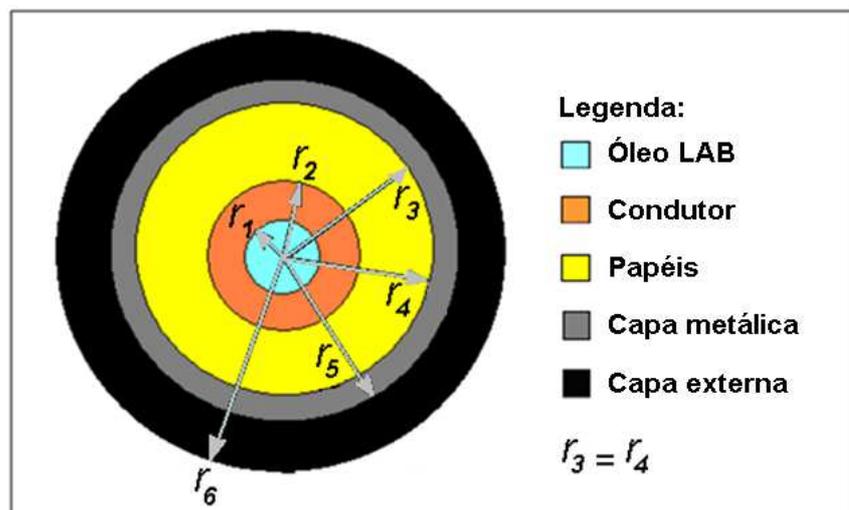


Figura 10 – Modelo para cabo OF com blindagem metálica de chumbo.

## 2.2.2 Formulação matemática

Nesta seção estão apresentadas as equações matemáticas utilizadas no cálculo do tempo de congelamento de cabos OF – Oil Filled.

O circuito elétrico da Figura 11 representa o modelo teórico apresentado na Figura 8, e após definir o circuito elétrico equivalente, é possível calcular o tempo para carregar o capacitor  $C_{total}$  no circuito elétrico. O tempo  $t$  calculado equivale ao tempo necessário para congelamento total do óleo.

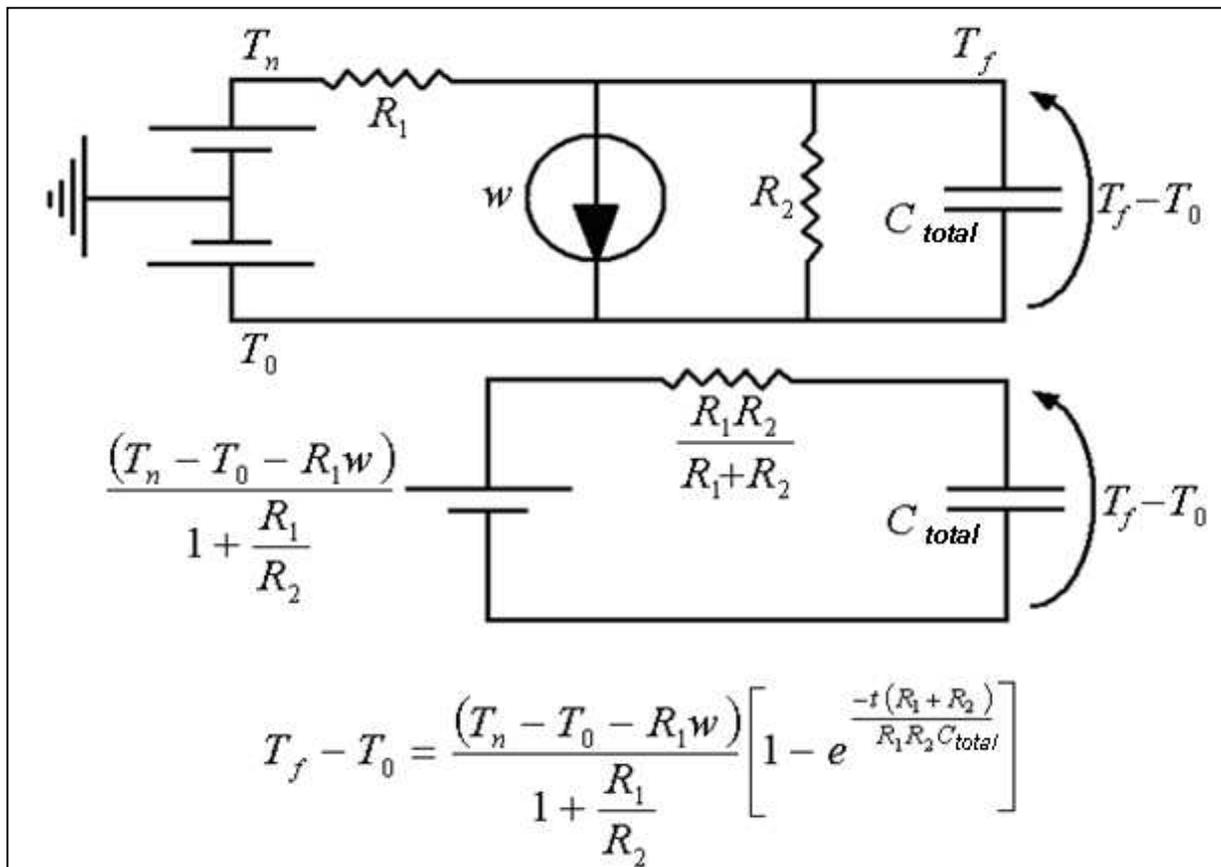


Figura 11 – Demonstração do modelo teórico.

$$t = \frac{-(R_1 C_{total})}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \times \ln \left\{ 1 - \left[ \frac{(T_f - T_0)}{(T_n - T_0 - R_1 w)} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \right] \right\} \quad (2.2)$$

As equações 2.3 a 2.8 indicadas a seguir são utilizadas para cálculo de todas as variáveis necessárias na equação 2.2, sendo que as mesmas foram adaptadas

de (ICHIYANAGI, N. et al, 1979). A principal alteração nas equações foi a consideração de camadas adicionais de materiais para os cálculos.

O cabo OF com blindagem metálica de alumínio possui óleo isolante na camada 4, representada na Figura 9 entre os raios  $r_3$  e  $r_4$ . Entretanto, o cabo OF com blindagem metálica de chumbo não possui esta camada de óleo, Figura 10, de modo que deverão ser considerados os valores de  $k_4 = k_3$  e  $r_4 = r_3$  para o cálculo das variáveis  $R_1$ ,  $k$  e  $C_{total}$  do cabo com blindagem metálica de chumbo.

- Cálculo de  $R_1$  - Resistência térmica entre o duto central e a superfície do cabo.

Considerando-se o trecho de cabo OF a ser congelado com comprimento  $l$ , pode-se calcular a resistência térmica transversal de cada camada do cabo utilizando o conceito demonstrado em (ÇENGEL, Y. A., 2009).

A resistência de uma camada de material é dada por:

$$R = \frac{1}{2\pi lk} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Calculando-se a resistência térmica de todas as camadas de um cabo OF, associando-as em série e utilizando-se o fator (0,4) sugerido por (ICHIYANAGI, N. et al, 1979), obtém-se a Equação 2.3 a qual pode ser utilizada para o cálculo de  $R_1$ .

$$R_1 = \frac{0,2}{\pi l} \times \sum_{i=2}^6 \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right)}{k_i} \quad (2.3)$$

- Cálculo de  $k$  - Condutividade térmica média do cabo.

Equação do cabo "Pipe" adaptada para cabo OF, considerando- se todas as camadas de materiais do mesmo.

$$k = \frac{1}{r_6^2} \times \left[ k_1 r_1^2 + \sum_{i=1}^5 k_{i+1} \times (r_{i+1}^2 - r_i^2) \right] \quad (2.4)$$

- Cálculo de  $R_2$  - Resistência entre o centro e o fim da câmara de congelamento.

Considerando- se o trecho de cabo OF a ser congelado com comprimento  $l$ , condutividade térmica média  $k$  e raio externo do cabo  $r_6$ , é possível calcular o valor de  $R_2$ , que equivale a  $R'_2 // R''_2$ , conforme indica a Figura 8.

$$R_2 = \frac{l}{4\pi r_6^2 k} \quad (2.5)$$

- Cálculo de  $Q$  - Fluxo vazante

Transformação de unidade ( $1 \text{ cm}^3/\text{s} = 3,6 \text{ l/h}$ ).

$$Q = 0,28 F_v \quad (2.6)$$

- Cálculo de  $w$  - Calor transportado pelo fluxo de óleo.

Equação original sugerida por (ICHIYANAGI, N. et al, 1979).

$$w = \rho_1 C_1 Q \times (T_f - T_0) \times \left[ 1 - e^{\left( \frac{-l}{\rho_1 C_1 Q} \right)} \right] \quad (2.7)$$

- Cálculo de  $C_{total}$  - Capacitância térmica total do cabo e do fluxo vazante de óleo.

Equação do cabo “Pipe” adaptada para cabo OF, considerando- se todas as camadas de materiais do mesmo.

$$C_{total} = l\pi \times \left\{ \rho_1 \times \left[ \frac{L_f}{T_0 - T_f} \times (r_1^2 + r_4^2 - r_3^2) + r_1^2 C_1 \right] + \sum_{i=2}^6 \rho_i C_i \times (r_i^2 - r_{i-1}^2) \right\} \quad (2.8)$$

### 2.2.3 Curvas de aplicação

Utilizando- se as equações da seção 2.2.2 e uma planilha do programa Excel, foi desenvolvido um simulador para cálculo de tempo de congelamento, onde os dados de entrada são as características do cabo OF e as condições do congelamento e o dado de saída é o tempo necessário para congelamento total do óleo. Na Figura 12 os dados de entrada correspondem a um cabo OF de 138 kV com temperatura inicial do óleo no valor crítico de 50°C, pois o congelamento é iniciado somente quando o cabo OF está desenergizado, ou seja, a temperatura do óleo encontra- se em um valor entre 25 e 50°C.

Congelamento de cabo com capa de chumbo				Congelamento de cabo com capa de alumínio			
<i>D</i>	18	mm	Diâmetro do canal interno de óleo	<i>D</i>	18	mm	Diâmetro do canal interno de óleo
<i>S</i>	1200	mm <sup>2</sup>	Área do condutor	<i>S</i>	1200	mm <sup>2</sup>	Área do condutor
<i>E</i>	12	mm	Espessura dos papéis	<i>E</i>	12	mm	Espessura dos papéis
<i>M</i>	5	mm	Espessura da capa de chumbo	<i>M</i>	2,5	mm	Espessura da capa de alumínio
<i>P</i>	6	mm	Espessura da capa de polietileno	<i>P</i>	6	mm	Espessura da capa de polietileno
				<i>O</i>	5	mm	Espessura do canal de óleo na capa de alumínio
<i>To</i>	50	°C	Temperatura inicial do óleo no cabo	<i>To</i>	50	°C	Temperatura inicial do óleo no cabo
<i>l</i>	80	cm	Comprimento da câmara de congelamento	<i>l</i>	105	cm	Comprimento da câmara de congelamento
<i>Fv</i>	1	l/h	Fluxo de óleo no ponto de congelamento	<i>Fv</i>	1	l/h	Fluxo de óleo no ponto de congelamento
<i>t</i>	51	min	Tempo necessário para congelamento total do óleo	<i>t</i>	52	min	Tempo necessário para congelamento total do óleo

Figura 12 - Simulador para cálculo de tempo de congelamento.

Nas simulações, a fim de representar uma grande variedade de cabos OF, foram utilizados os parâmetros indicados a seguir:

Área do condutor = 1200 mm<sup>2</sup>

Diâmetro do canal interno de óleo = 18 mm

Espessura dos papéis 138 kV = 1,2 cm

Espessura dos papéis 230 kV = 1,7 cm

Espessura dos papéis 345 kV = 2,1 cm

Espessura da blindagem de chumbo = 5 mm

Espessura da blindagem de alumínio = 2,5 mm

Espessura da capa de polietileno = 6 mm

Temperatura inicial do óleo no cabo = 50°C

A seguir temos as Figuras 13 a 18, que ilustram respectivamente os tempos necessários para congelamento de cabos típicos 138, 230 e 345 kV em função do comprimento da câmara de congelamento e do fluxo de óleo que circula pelo mesmo no ponto de congelamento.

Deve ser observado que cada figura apresenta 2 gráficos com 4 curvas diferenciadas pelos seus números, sendo:

Curva 1 - fluxo de óleo 1 l/h interno ao cabo OF no ponto de congelamento.

Curva 2 - fluxo de óleo 2 l/h interno ao cabo OF no ponto de congelamento.

Curva 3 - fluxo de óleo 3 l/h interno ao cabo OF no ponto de congelamento.

Curva 4 – fluxo de óleo 4 l/h interno ao cabo OF no ponto de congelamento.

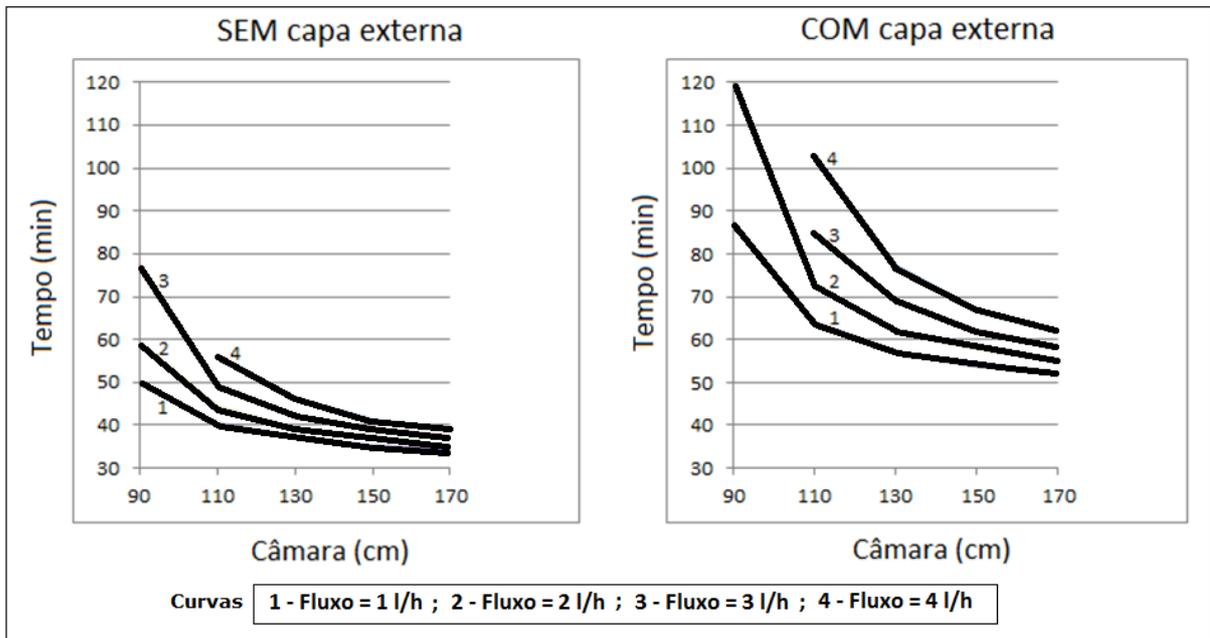


Figura 13 – Tempo para congelamento de cabo OF de 138 kV com blindagem metálica de alumínio.

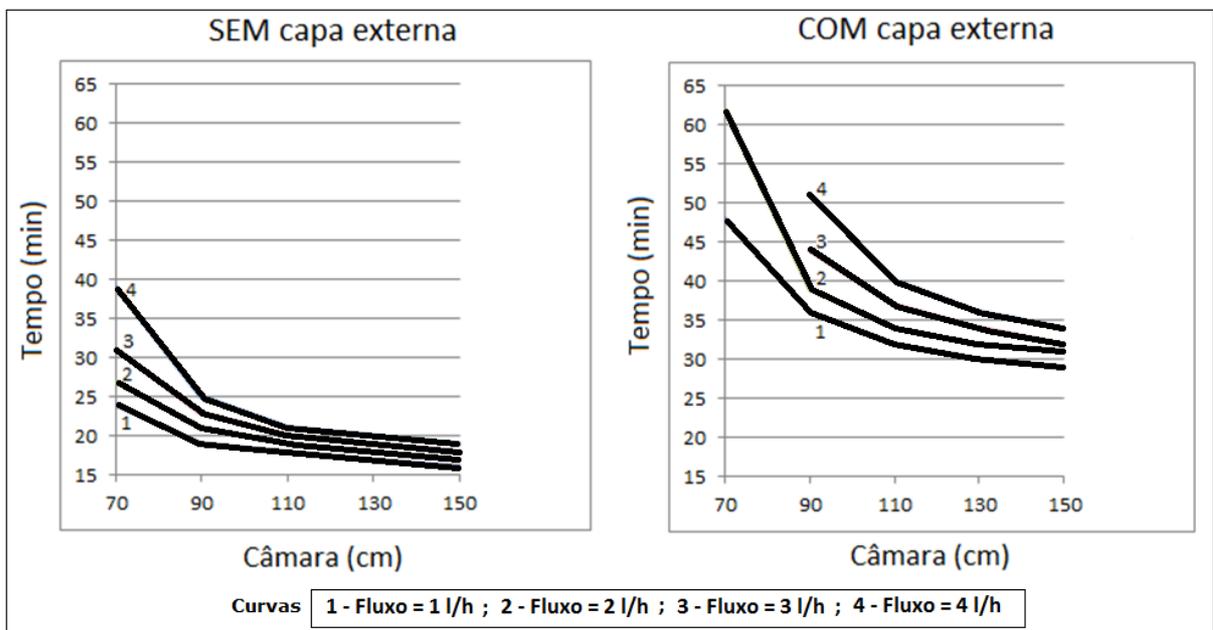


Figura 14 – Tempo para congelamento de cabo OF de 138 kV com blindagem metálica de chumbo.

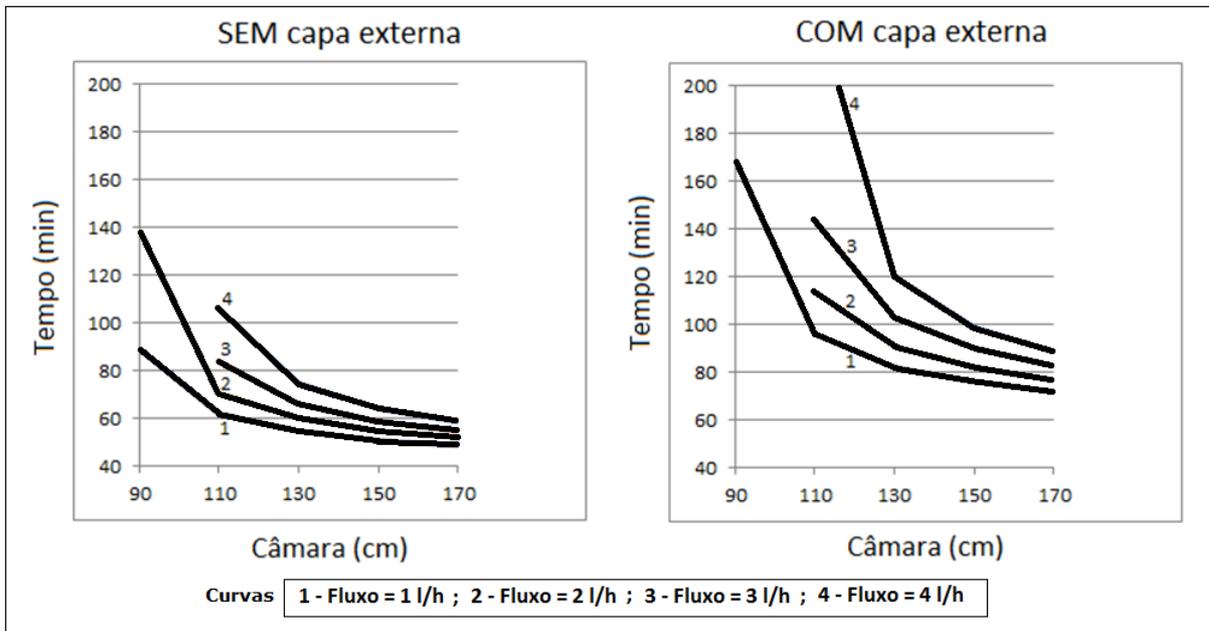


Figura 15 – Tempo para congelamento de cabo OF de 230 kV com blindagem metálica de alumínio.

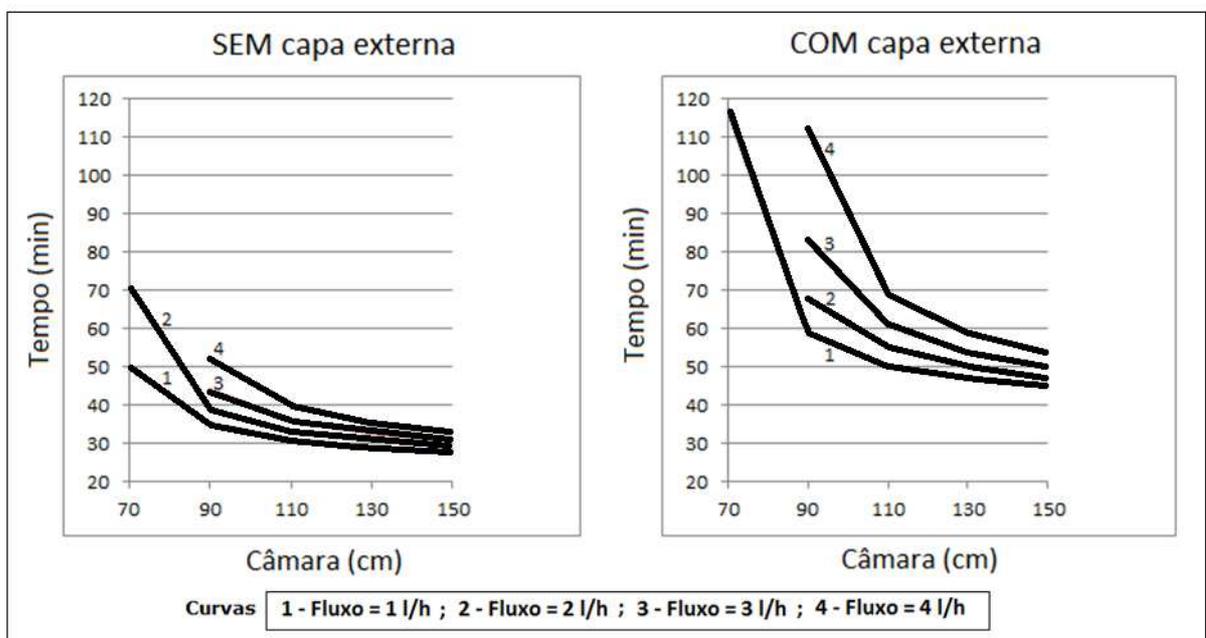


Figura 16 – Tempo para congelamento de cabo OF de 230 kV com blindagem metálica de chumbo.

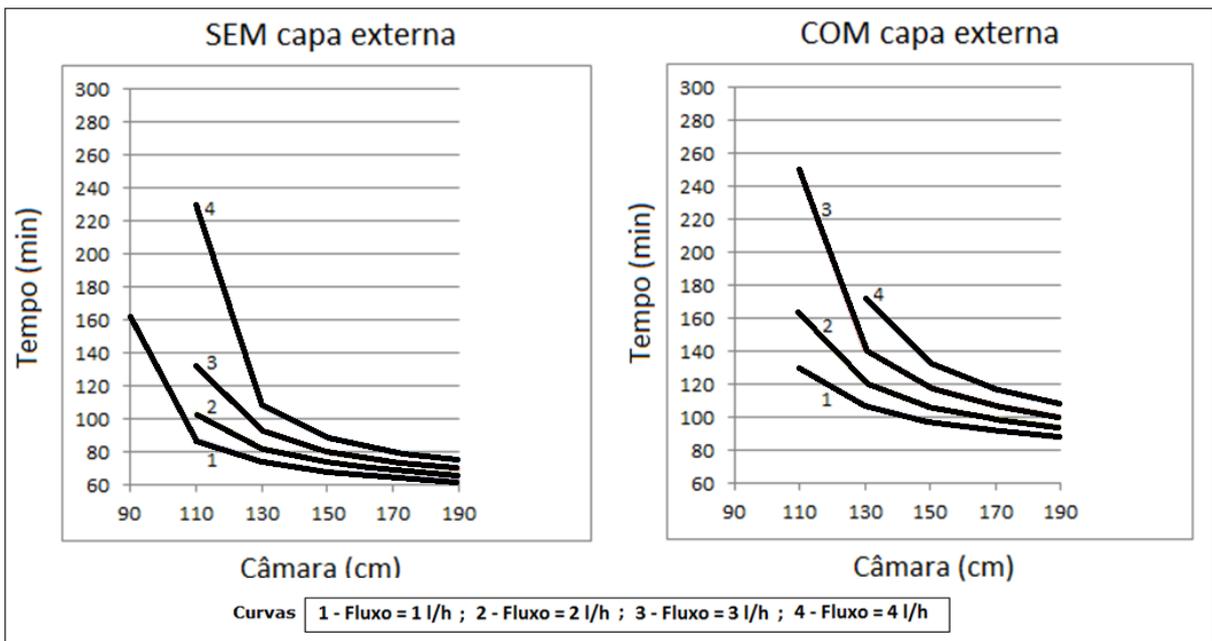


Figura 17 – Tempo para congelamento de cabo OF de 345 kV com blindagem metálica de alumínio.

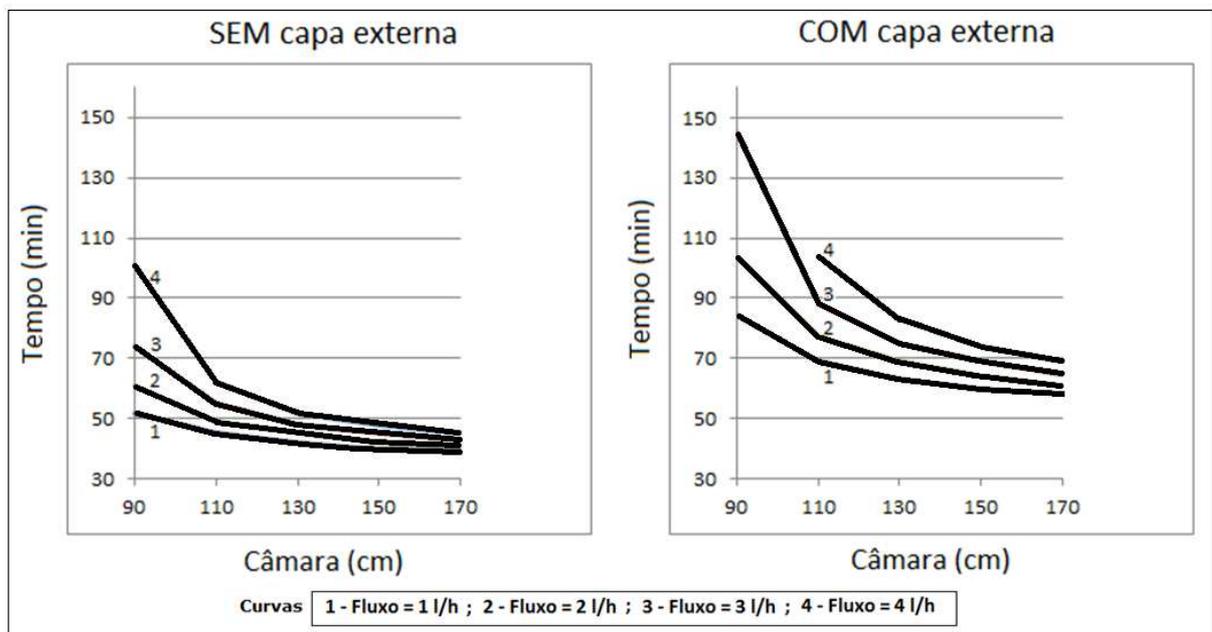


Figura 18 – Tempo para congelamento de cabo OF de 345 kV com blindagem metálica de chumbo.

### 2.3 Ensaios experimentais - método do congelamento

Em novembro de 2008 e maio de 2010 foram realizados 5 congelamentos na linha XAVANTES-BANDEIRANTES de 345 kV a fim de localizar vazamentos de óleo.

Com os dados dos processos de congelamento e a utilização da Figura 19, foi possível comparar os tempos de congelamento medidos e calculados, a fim de aferir o modelo teórico.

O registro dos congelamentos realizados estão no Anexo 1.

As curvas de aplicação apresentadas na seção 2.2.3 são genéricas, com o objetivo de serem utilizadas para definir o tamanho da câmara de congelamento mais adequada para cada tipo de cabo OF. Em relação aos ensaios experimentais, é importante destacar que todas as câmaras de congelamento foram confeccionadas com o mesmo comprimento, cerca de 100 cm, desconsiderando a possibilidade de se utilizar o comprimento de melhor desempenho para cada tipo de cabo. O comprimento de 100 cm foi definido com base na experiência prática dos técnicos de manutenção da CTEEP, visto que ainda não havia o modelo teórico e o simulador de congelamento. Os procedimentos existentes até o ano 2012 para realização do congelamento definiam apenas os diagramas hidráulicos a serem utilizados, assim como a maneira adequada de se interpretar os resultados das aquisições dos dados, sem uma indicação do comprimento da câmara de congelamento.

A seguir estão os dados do cabo e os parâmetros para simulação utilizados na criação dos gráficos da Figura 19:

**- Dados do Cabo:**

$$k_1 = 0,00133 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$k_2 = 3,85 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$k_3 = 0,002 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$k_4 = 0,00133 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$k_5 = 2,37 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$k_6 = 0,00286 \text{ W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$r_1 = 0,9 \text{ cm}$$

$$r_2 = 2,1815 \text{ cm}$$

$$r_3 = 4,1305 \text{ cm}$$

$$r_4 = 4,4942 \text{ cm}$$

$$r_5 = 4,6642 \text{ cm}$$

$$r_6 = 5,1242 \text{ cm}$$

$$C_1 = 1,7 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_2 = 3,45 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_3 = 2 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_4 = 1,7 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_5 = 2,5 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$C_6 = 2,4 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$$

$$L_f = 210 \text{ cal/g}$$

$$\rho_1 = 0,864 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_2 = 8,9 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_3 = 1,53 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_4 = 0,864 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_5 = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_6 = 0,94 \text{ g/cm}^3$$

**- Parâmetros para simulação:**

$$T_f = -70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_n = -195 \text{ °C}$$

$$l = 100 \text{ cm}$$

$$F_v = 4 \text{ e } 1 \text{ l/h}$$

A Tabela 2 apresenta a aferição do modelo teórico, sendo que os tempos simulados foram extraídos da Figura 19 e estão indicados na coluna “Tempo Simulado de Congelamento (min)”. A coluna “Tempo Real de Congelamento (min)” indica os tempos experimentais, extraídos das Figuras 35 a 39, constantes do Anexo 1.

Tabela 2 - Comparação entre tempos medidos em campo (Real) e tempos extraídos das curvas de aplicação (Simulado).

Número do Congelamento (N)	Data do Congelamento (dd/mm/aaaa - hh:mm)	Tamanho da Câmara (cm)	Fluxo Inicial Estimado (l/h)	Tempo Real de Congelamento(min)	Tempo Simulado de Congelamento (min)	Erro Calculado (%)
1	22/11/2008 - 20:30	100	4	240	295	23
2	23/11/2008 - 10:00	100	4	240	295	23
3	23/11/2008 - 19:00	100	4	210	295	40
4	01/05/2010 - 07:00	100	1	120	120	0
5	02/05/2010 - 08:00	100	1	110	120	9

A Figura 19 a seguir apresenta as curvas de aplicação para cabo OF 345 kV com fluxos de óleo nos valores 1 l/h e 4 l/h, assim como os valores experimentais indicados na Tabela 2.

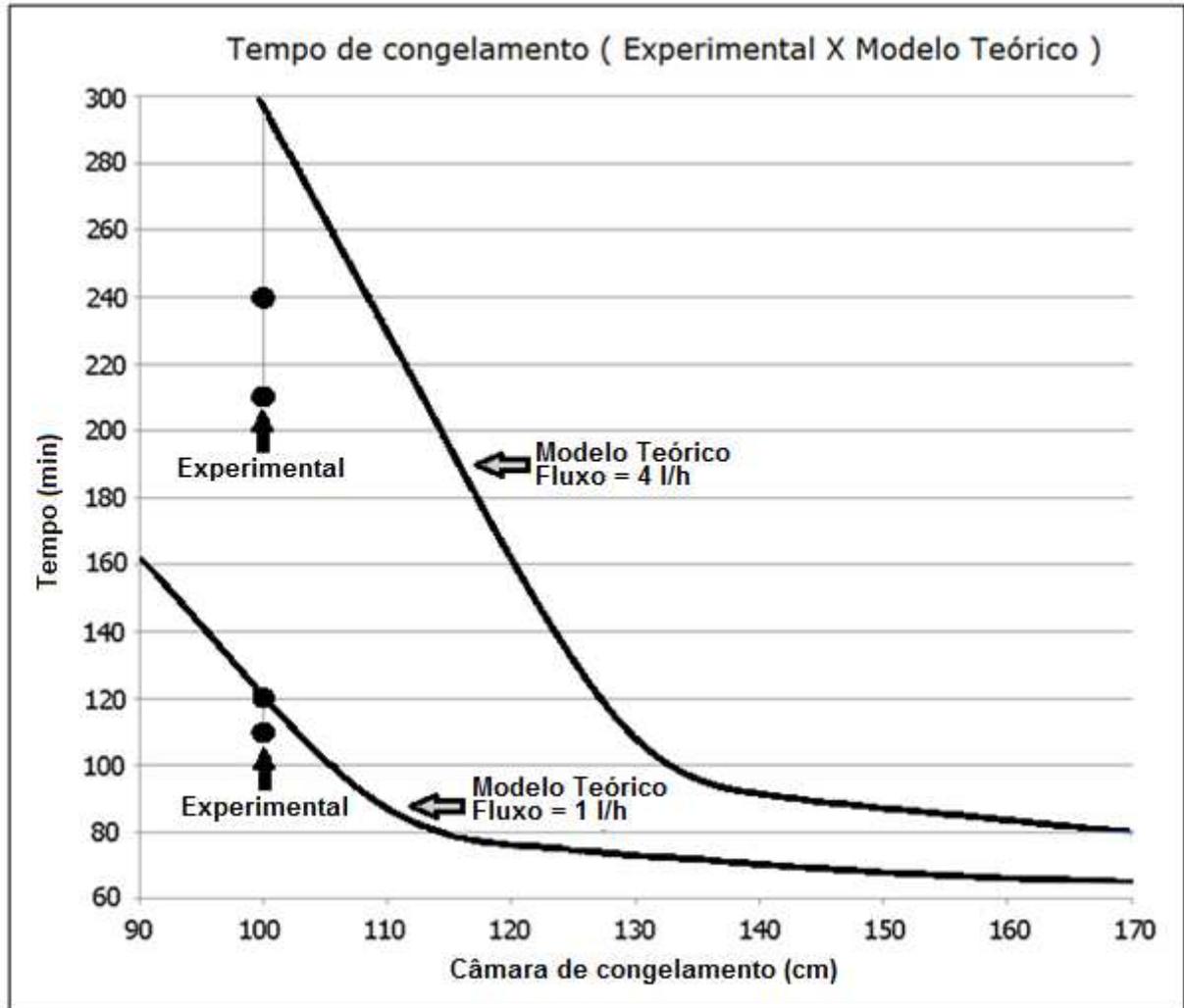


Figura 19 – Comparação entre tempos de congelamento calculados e medidos.

## 2.4 Discussões - método do congelamento

O método do congelamento é rápido, podendo localizar vazamentos de óleo a partir de 300 litros por mês e o tempo estimado para a localização é de 5 dias, sendo que a linha subterrânea deverá estar desenergizada, possibilitando escavações nas vias públicas, inclusive com a interrupção de trânsito de veículos.

O método do congelamento é adequado para os casos onde há curto circuito à terra, com danificação da isolação do cabo OF, seguido de grande vazamento de óleo, ou nos casos de grandes trincas nos acessórios das emendas enterradas e embora o método seja bastante difundido, não há instrumentos para testes controlados. Neste sentido, este trabalho procurou sanar esta deficiência,

apresentando o modelo teórico de congelamento, preenchendo esta lacuna em relação aos cabos OF.

Conhecendo as características dos materiais dos cabos OF, foi possível construir os gráficos das Figuras 13 a 18, das quais podem ser obtidas as variáveis mais importantes para o congelamento do cabo, quais sejam: temperatura inicial e fluxo de óleo interno ao cabo no ponto de congelamento, comprimento da câmara de congelamento, espessura dos papéis isolantes e espessura da capa externa de polietileno ou PVC.

Na Tabela 2 e Figura 19 é possível verificar que o modelo teórico apresentou erro em relação ao teste de congelamento real, que variou de 0% a 40%. Foi observado, na análise teórica e também utilizando câmara de congelamento de 100 cm em cabos com fluxos de óleo de 1 l/h e 4 l/h, que quanto menor o comprimento da câmara, para um mesmo fluxo de óleo interno ao cabo no ponto de congelamento, maior é a tendência de não se congelar o cabo e maior é o erro entre o valor real e o valor simulado do tempo de congelamento.

Ao se utilizarem as curvas de aplicação, Figuras 13 a 18, que foram obtidas com dados de simulações, é possível definir uma câmara de congelamento para o tempo de aproximadamente 60 min ou menos. Neste caso, o erro entre tempo real e simulado será de apenas alguns minutos, o que não é significativo para o contexto do teste.

Os testes de congelamento realizados em 2008 e 2010, cujos gráficos estão apresentados no Anexo 1 desta dissertação, foram realizados com base nos procedimentos de manutenção da CTEEP, porém os procedimentos não definem o comprimento da câmara de congelamento, pois cada caso de vazamento de óleo necessita de uma câmara com comprimento diferente. Nesta ocasião, a definição da câmara foi baseada na experiência prática dos técnicos de manutenção da CTEEP, visto que ainda não havia o modelo teórico e o simulador de congelamento.

Tomando como base o gráfico do primeiro congelamento, indicado na Figura 35 do Anexo 1, é possível verificar que o tempo de congelamento foi de 240 min, ou seja, 04:00 h.

Se a câmara de congelamento tivesse 170 cm ao invés de 100 cm, a simulação indica que o tempo de congelamento teria sido de aproximadamente 80 min, o que representaria uma redução significativa da indisponibilidade da linha subterrânea.

Quanto ao gráfico do quarto congelamento, indicado na Figura 38 do Anexo 1, é possível verificar que o tempo de congelamento foi de 120 min, ou seja, 02:00 h.

Se a câmara de congelamento tivesse 170 cm ao invés de 100 cm, o tempo de congelamento teria sido de aproximadamente 75 min, o que representa uma redução significativa da indisponibilidade da linha subterrânea.

Ainda são necessários mais dados de congelamentos reais para aferição do modelo teórico, sendo que devem-se utilizar câmaras de congelamento com comprimento planejado, utilizando as curvas de aplicação, para se obter cerca de 60 min de tempo de congelamento. A suposição para o erro de 40% indicado na Tabela 2 é que o modelo teórico possui limites de funcionalidade, ou seja, quando o tempo de congelamento está no limite de atingir um valor “infinito”, o modelo não é aplicável.

A fim de compor o custo médio de uma localização de vazamento de óleo pelo método do congelamento, podem ser considerados os seguintes gastos (estimados):

- 1- Homem x hora (200 Hxh) de técnicos de manutenção em cabos subterrâneos para preparação da mistura, injeção do óleo no cabo e coleta de ar para envio ao laboratório= R\$9.000,00;
- 2- Perda de remuneração da linha subterrânea pela indisponibilidade (600 R\$/h durante 96 h) = R\$57.600,00;
- 3- Escavações e recomposição do solo, montagem e desmontagem de cabanas (considerando 5 congelamentos) = R\$25.000,00;
- 4- Transporte e materiais de consumo = R\$10.000,00;

TOTAL = R\$101.600,00.

### **3 MÉTODO DO PFT**

#### **3.1 Estado da arte - método do PFT**

Em relação ao método do PFT (traços de perfluorcarbono), foram buscados artigos para levantar informações sobre o uso de compostos indicadores na localização de vazamentos de óleo em cabos subterrâneos.

Os trabalhos e artigos foram levantados em publicações do Electric Power Research Institute (EPRI), do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) entre outras fontes e as informações sobre os compostos indicadores foram levantadas junto aos principais tratados e convenções internacionais e seus correspondentes no Brasil.

##### **3.1.1 Aspectos gerais**

A literatura reporta duas classes de compostos que são usados como indicadores na detecção de vazamentos de óleo em cabos subterrâneos: os Perfluorcarbonos (PFCs), também denominados de PFT (traçadores Perfluorcarbono), e o Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>). Neste tipo de aplicação, os gases são introduzidos em pequenas quantidades no cabo OF desgaseificado, sendo necessário um método de detecção destes quando da ocorrência de vazamentos de óleo.

O EPRI publicou um relatório completo (EPRI, 1997) onde foi desenvolvida e demonstrada a viabilidade do método de PFT na localização de vazamentos de cabos subterrâneos.

Neste relatório vários aspectos foram abordados, desde ensaios de laboratório onde foram avaliados parâmetros que afetam a difusão destes compostos no solo, até ensaios demonstrativos piloto. Instrumentos para detectar traços de PFCs dispersos no ar também são descritos. Os principais resultados deste relatório indicaram que é possível detectar PFC no ar em concentrações na ordem de partes por trilhão próximo ao local de vazamento de óleo, em uma região

com poucas centenas de metros e através de coletas de ar no solo é possível indicar o local exato do vazamento de óleo do cabo subterrâneo.

O uso de PFCs na detecção de vazamentos de gasolina em tubulações tem sido discutida (DIETZ, N.; SENUM, G., 1998) e comparada pelos autores com outras tecnologias baseadas em medidas de pressão, acústicas e de análises de laboratório, pela investigação de traços de gasolina em amostras de solo.

### **3.1.2 Perfluorcarbonos**

Os perfluorcarbonos (PFCs) são compostos sintetizados, amplamente utilizados em medicina e equipamentos de refrigeração livres de CFCs – Clorofluorcarbonos (freons) e estão disponíveis no mercado nacional. Os PFCs também têm sido usados para avaliar o transporte de gases em sistemas de cobertura, capas ou tampas, de solos com resíduos químicos enterrados (HEISER, J. et al, 2004).

A White Martins possui o produto comercial denominado Halocarbono 116, que é composto pelo hexafluoretano (WHITE MARTINS, 2002). Também existem outros fornecedores de PFCs, como a Sigma Aldrich.

Os PFCs são formados por compostos que contém basicamente átomos de carbono e de flúor, onde os átomos de flúor se encontram ligados aos de carbono.

As características dos PFCs estão relacionadas com a estrutura química dos compostos que os constituem. Foi feito um levantamento das características químicas e físico-químicas de alguns compostos PFCs comercialmente disponíveis e foi constatado que estes não apresentam risco à saúde e higiene do trabalho, e nesse tipo de aplicação (cabos subterrâneos) o impacto ambiental é desprezível.

### **3.1.3 Uso do PFC**

(TRACER DETECTION TECHNOLOGY CO, 2002) relatou, em um resumo técnico, que na seleção de um composto indicador, devem ser levados em conta 4 principais aspectos:

- 1) A interferência de componentes atmosféricos na detecção do composto;
- 2) a pressão de vapor do composto;
- 3) o tempo de vida do composto na atmosfera;
- 4) a não toxicidade do composto em níveis iguais ou abaixo de ppm (partes por milhão).

Foi reportado também no resumo técnico de (TRACER DETECTION TECHNOLOGY CO, 2002), que os compostos PFCs, mais especificamente o composto Perfluorcarbono 1,3-dimetilciclohexano (C<sub>8</sub>F<sub>16</sub>), utilizado como indicador na detecção de vazamentos de cabos, atende a todos estes requisitos. No relatório técnico final, os autores apresentaram os resultados obtidos a partir da aplicação de diferentes métodos para detectar o PFC, como cromatografia em fase gasosa acoplada ao detector de captura de elétrons (ECD) e espectroscopia na região do infravermelho (TRACER DETECTION TECHNOLOGY CO, 2002).

No relatório do Amarillo National Resource Center for Plutonium estão mostradas as propriedades de PFCs de baixa massa molar, incluindo a pressão de vapor (ANRCP,1998).

Sullivan e colaboradores utilizaram uma mistura de PFCs constituída por: perfluordimetilciclobutano, perfluordimetilciclopentano, perfluordimetilciclohexano, 1,4-trans-dimetilciclohexano e perfluorimetilciclohexano. Os resultados obtidos foram satisfatórios quanto ao uso da mistura de PFCs na localização da falha (SULLIVAN, T. et al, 1999).

A EDF Energy Networks desenvolveu em parceria com a empresa FEMTOTRACE inc., um equipamento móvel, que permite a detecção, em tempo real, de compostos indicadores a base de PFCs (CROUCHER, 2008). O equipamento desenvolvido por esta empresa permite a localização de pequenos volumes de vazamentos, tipicamente em torno de 50 litros/mês. Como o equipamento é de médio porte, a empresa instalou-o dentro de um veículo para realizar a investigação de PFCs, provenientes de vazamentos de cabos, por exemplo. No trabalho citado, não é feita menção ao nome comercial do equipamento desenvolvido.

O uso do analisador “dual trap analyser” ou DTA móvel, com coleta ativa e pré concentração de PFC, instalado em um veículo, também tem sido reportado na literatura (GHAFURIAN, 1999), enquanto um dispositivo coleta a amostra de ar, o

outro promove a dessorção do PFT coletado, cuja concentração é determinada por um detector de captura de elétrons (ECD). Os autores se referem ao método do uso do PFT como sendo mais barato e mais rápido em relação ao método de congelamento.

Segundo os autores, o PFT na forma líquida é misturado ao óleo e quando ocorre o vazamento, a mistura óleo/PFT molha o solo, o PFT evapora e é transportado para a superfície. Usualmente a emissão do vapor de PFT no ar é estabilizada num período de tempo inferior a 24 h (GHAFURIAN, 1999). A concentração típica de PFT no ar, no local do vazamento, é da faixa de poucos a várias centenas de partes por quadrilhão (ppq), sendo que a concentração natural do PFT no ar “background” é próximo de 1 ppq. Como o detector de ECD é muito sensível aos PFTs, concentrações menores que 1 ppq acima do background podem ser usadas para localizar vazamentos muito pequenos, da ordem de 1 galão/dia (GHAFURIAN, 1999).

Hassoun e colaboradores (HASSOUN, 2000) desenvolveram monitores para realizar a coleta de 4 compostos de PFTs injetados em cabos OF (perfluordimetilciclobutano, perfluordimetilciclopentano, perfluordimetilciclohexano e perfluor-1,3-dimetilciclohexano). Os monitores foram levados ao laboratório e analisados por cromatografia em fase gasosa acoplada ao detector de ECD.

Os compostos foram precisamente detectados dentro de 3 m, sem escavação prévia.

Monitores passivos de coleta do ar contaminado com PFTs também foram usados por Heiser e colaboradores (HEISER, 2001). Os monitores foram instalados ao longo de um duto. Após 24 h de injeção dos PFTs no duto, os monitores foram coletados periodicamente durante 10 dias e analisados em laboratório. Os resultados obtidos foram mapeados para identificar o local do vazamento.

No relatório do Amarillo National Resource Center for Plutonium (ANRCP, 1998) o gás SF<sub>6</sub> também foi testado como composto indicador de vazamento em contêineres de armazenamento de plutônio, em paralelo com os PFCs. Ambos os traços dos compostos indicadores foram quantificados por cromatografia em fase gasosa acoplada ao detector de ECD (detector de captura de elétrons).

A detecção de vazamentos em condensadores usando o SF<sub>6</sub> como gás indicador também tem sido reportada (EPRI, 1988).

### 3.2 Proposta - método do PFT

A proposta a seguir foi definida a partir de experimentos realizados em campo nos anos 2011 e 2012, sendo que são indicadas as melhores práticas para preparar a mistura de óleo com PFC, injetar esta mistura no cabo OF e realizar a coleta do ar na região onde se quer localizar o vazamento de óleo do cabo OF.

Os compostos perfluorcarbonos e o gás SF<sub>6</sub> são referenciados na literatura como os principais indicadores/marcadores na detecção de vazamentos de óleo em cabos OF.

O estado físico foi um dos fatores levados em consideração na escolha do tipo de marcador, pois é mais fácil preparar misturas a partir de dois componentes líquidos do que de um gasoso em um líquido. Por conta disto, o SF<sub>6</sub> foi descartado do presente estudo, sendo selecionado o composto Perfluor 1,3-dimetilciclohexano como marcador.

A Figura 20 indica as características do composto Perfluor 1,3-dimetilciclohexano.

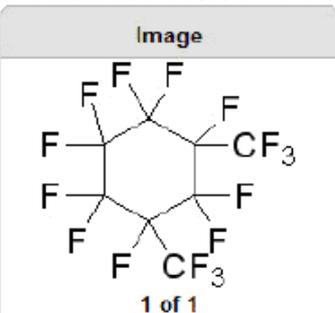
282316		Perfluoro-1,3-dimethylcyclohexane	
Aldrich		technical grade, 80%	
★★★★★			
Be the first to <a href="#">write a review</a> .			
<b>Price and Availability</b>			
Product	Your Price		
Number	BRL	Available to Ship	Quantity
282316-50G	248.00	Date not Available <a href="#">details...</a>	<input type="text" value="2"/>
		<a href="#">★</a> <a href="#">🛒</a> <a href="#">📄</a>	
<b>Synonym:</b>	Decafluoro-1,3-bis(trifluoromethyl)cyclohexane, Hexadecafluoro-1,3-dimethylcyclohexane, Hexadecafluoro-1,3-dimethylcyclohexane ( <i>cis+trans</i> )		
<b>CAS Number:</b>	335-27-3		
<b>Linear Formula:</b>	C <sub>8</sub> F <sub>10</sub> (CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		
<b>Molecular Weight:</b>	400.06		
<b>Beilstein Registry Number:</b>	2064147		
<b>EC Number:</b>	206-386-9		
<b>MDL number:</b>	MFCD00001469		
<b>PubChem Substance ID:</b>	24857038 <a href="#">🔗</a>		
		<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Image</b>              1 of 1         </div>	

Figura 20 – Características do composto Perfluor 1,3-dimetilciclohexano. Fonte: SIGMA ALDRICH, 2011.

### 3.2.1 Obtenção da mistura LAB+PFC

Para calcular o volume de PFC a ser misturado com o óleo, deve-se primeiramente conhecer o volume de óleo Linear Alquilbenzeno (LAB) que vai receber o PFC. Sabendo que a densidade do óleo LAB é 0,89 kg/l e a do PFC é 1,84 kg/l, basta definir o ppm (m/m) de PFC desejado e aplicar na Equação 3.1:

$$V_{PFC} = \frac{V_{LAB} \cdot D_{LAB}}{10^6 \cdot D_{PFC}} \cdot PPM_{PFC} \quad (3.1)$$

Legenda:

$V_{PFC}$  – Volume de PFC (l)

$V_{LAB}$  – Volume de óleo LAB (l)

$D_{PFC}$  – Densidade do PFC (kg/l)

$D_{LAB}$  – Densidade do óleo LAB (kg/l)

$PPM_{PFC}$  – Parte por Milhão de PFC (m/m)

Como o PFC é fornecido por massa, para se saber a quantidade necessária será utilizada a Equação 3.2:

$$P_{PFC} = V_{PFC} \times D_{PFC} \quad (3.2)$$

onde  $P_{PFC}$  é a massa de PFC necessária para o volume de PFC.

Para sabermos a quantidade de PFC a ser utilizada em uma linha, devemos ter a quantidade de óleo a ser substituída nos cabos e através da Equação 3.1 calculamos o valor de  $V_{PFC}$  para esse volume e depois calculamos a massa total do PFC a ser adquirida.

A fim de preparar a mistura **LAB+PFC** pode ser utilizado um tanque de 300 litros com pressão inicial de 3 bar. Este tanque é de fabricação PRYSMIAN.

O primeiro passo é realizar o tratamento do óleo que já está no tanque. Neste procedimento é necessário fazer a circulação do óleo do tanque. É retirado o óleo do

tanque e injetado simultaneamente óleo desgaseificado, de modo que o Residual Gas Pressure (RGP), ou pressão de gás residual do óleo é reduzida até atingir um valor aceitável para injeção nos cabos. Para início da injeção de PFC, a pressão do tanque deve ser mantida em 3 bar, isto é, com pouco óleo útil dentro do mesmo.

Em seguida o PFC deverá ser injetado no tanque através de um dispositivo formado por um tubo de chumbo, com 4 válvulas de controle e um reservatório de entrada para o PFC, como mostra a Figura 21.

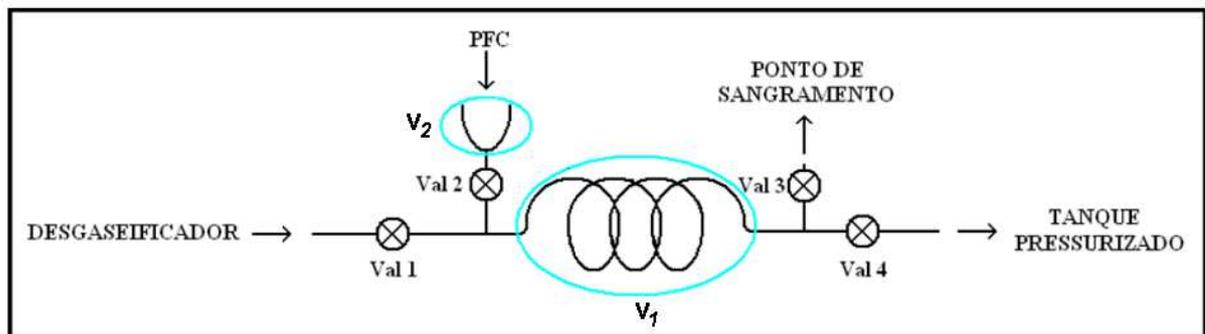


Figura 21 – Dispositivo para injeção de PFC em tanque de óleo. Fonte: ALMEIDA, D. M. et al, 2011.

O dispositivo deverá ter o volume  $V_1$ , referente à serpentina de tubo de chumbo, pelo menos duas vezes maior que o volume  $V_2$ , referente à quantidade de PFC que será colocado no reservatório.

Para que a mistura de PFC com óleo LAB seja injetada com segurança dentro do tanque pressurizado os seguintes passos devem ser seguidos:

- Conectar o desgaseificador na Válvula Val 1, e fazer com que o óleo tratado percorra toda a serpentina e saia pela válvula Val 4, que deve ficar regulada, pois assim todo o ar interno será eliminado. Fechar a válvula Val 4 e abrir as válvulas Val 2 e Val 3, para evitar que fique ar preso nesses pontos. Fechar essas válvulas;

- Conectar o tanque pressurizado na Válvula Val 4, seguindo o procedimento para que não entre ar nos tubos de conexão;

- Depois de realizadas as conexões manter as Válvulas Val 1 e Val 4 fechadas;

- Colocar dentro de uma seringa de vidro a quantidade de PFC necessária para que seja atingida a concentração da mistura desejada, entre 20 e 100 ppm. Conectar a seringa com PFC na válvula Val 2 e outra vazia na válvula Val 3;

- Para colocar o PFC da seringa dentro da serpentina, deverá ser aberta a Válvula Val 2 e em seguida a Válvula Val 3. Ao se pressionar o êmbolo da seringa ligada na válvula Val 2 o PFC descerá do reservatório expulsando óleo pelo ponto de sangramento, preenchendo assim a seringa conectada na válvula Val 3 até que atinja o mesmo volume inicial da seringa que injetou PFC;

- Fechar as Válvulas Val 2 e Val 3, e abrir as Válvulas Val 1 e Val 4 para que assim possa ser injetada a mistura dentro do tanque pressurizado;

O PFC é injetado no tanque com baixa carga para aumentar a velocidade de homogeneização da mistura;

O tanque deverá receber a injeção de óleo LAB até que atinja sua máxima pressão de trabalho que é cerca de 5,5 bar.

### **3.2.2 Injeção da mistura LAB+PFC nos cabos**

O procedimento descrito nesta seção foi proposto por (ALMEIDA, D. M. et al, 2011).

O primeiro passo para a injeção da mistura LAB+PFC nas Linhas de Transmissão Subterrâneas é calcular qual o volume de óleo presente no duto central do trecho hidráulico do cabo correspondente, pois este será o volume da mistura que deverá ser preparado e injetado no mesmo.

A mistura deve ser aplicada em uma extremidade do trecho hidráulico e o óleo do duto central do cabo deve ser retirado pela outra extremidade simultaneamente, de modo que não cause grandes variações de pressão no cabo, pois esta operação será feita com o circuito energizado.

Segue na Figura 22, a representação do esquema da montagem hidráulica.

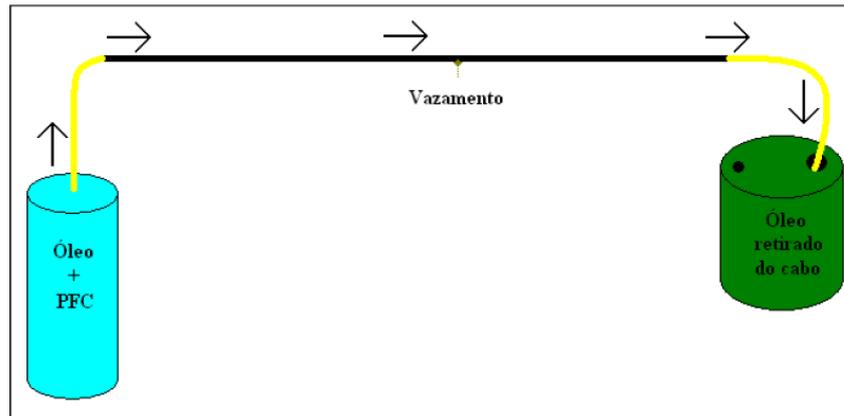


Figura 22 - Montagem hidráulica para injeção da mistura LAB+PFC nos cabos. Fonte: ALMEIDA, D. M. et al, 2011.

Cada tanque com a mistura conseguirá injetar no cabo cerca de 95 litros da mistura por operação, considerando sua pressão inicial em torno de 5,5 bar e sua pressão final em torno de 3 bar. A operação deverá ser repetida até que todo o óleo LAB do duto central do trecho hidráulico do cabo seja substituído pela mistura.

Depois de injetada a mistura, deve-se retirar amostras de óleo a cerca de 100 m e 200 m da extremidade para realizar análise laboratorial para saber qual a concentração de PFC presente no mesmo. Essa análise deve ser realizada logo após a injeção, 10 dias depois, 20 depois e 30 dias depois, pois assim é possível avaliar o comportamento do PFC dentro do cabo.

Para conseguir amostras de óleo a essas distâncias é necessário calcular o volume de óleo do duto central do cabo para 100 m e 200 m, retirar essa quantidade de óleo calculada e logo após retirar e analisar as amostras.

### 3.2.3 Coleta do ar

Após injetar a mistura LAB+PFC nas Linhas de Transmissão Subterrâneas, é necessário realizar a coleta do ar próximo ao trecho de cabo com vazamento de óleo.

As principais instruções para coleta do ar a ser analisado em laboratório químico são as seguintes:

- Vazão de amostragem: 400 ml/min;
- Volume: 2 a 48 l. Coletar a amostra por um período de 5 a 120 minutos.

Nota: As coletas deverão ser realizadas em ambiente com umidade relativa abaixo de 70% e temperatura ambiente abaixo de 35°C.

- Acondicionamento da amostra: manusear os amostradores com luva de procedimento. Colocar individualmente em saco de polietileno, lacrar e transportar sob refrigeração em caixa de isopor com bolsas de gelo recicláveis congeladas.
- Estabilidade da amostra: Manter sob refrigeração abaixo de 4°C. Analisar o mais breve possível.

Os equipamentos indicados para realização da coleta das amostras de ar são os seguintes:

- Tubo pré concentrador de vapores com carvão ativado CARBOPACK-B.
- Bomba de amostragem de ar de baixa vazão, Figura 40;
- Calibrador para bomba de amostragem de ar de baixa vazão conforme Figura 41.

As imagens dos equipamentos, Figuras 40 e 41, estão no Anexo 2.

### **3.2.4 Metodologia de análise**

A proposta é que as análises sejam realizadas segundo metodologia adaptada (*EPA T0-17 e ISO 16017, Indoor, ambient and workplace air – sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube thermal desorption capillary gas chromatography - Part 2: diffusive sampling*), ou seja, cromatografia gasosa (CG) com dessorvedor térmico e detector ECD.

As análises químicas para quantificação de PFC demonstradas nesta dissertação foram realizadas em dois laboratórios, sendo: DIAGNO, na cidade de Curitiba e ENVIRON, na cidade de São Bernardo do Campo.

Os equipamentos indicados para realização da análise química das amostras de ar coletadas são os seguintes:

- Cromatógrafo gasoso com detector ECD, configurado com coluna cromatográfica de fase 624, composição 6% Cyanopropyl-phenyl; 94%

dimethylpolysiloxane, polaridade média, 60m de comprimento, 0,25 mm de diâmetro interno e 1,4 µm de espessura do filme de fase estacionária. Esse equipamento possui sistema de controle de temperatura e controle automático de fluxo, conforme Figura 42. O cromatógrafo gasoso é um equipamento utilizado para separar gases, de forma que dado um volume conhecido de ar amostrado na atmosfera, é possível determinar a concentração do PFC. O detector ECD é extremamente sensível aos perfluorcarbonos.

- Dessorvedor térmico, conforme Figura 43. O dessorvedor térmico é o equipamento responsável por dessorver o PFC pré concentrado nos tubos de amostragem de ar. A massa de PFC dessorvida do tubo é enviada ao cromatógrafo gasoso a fim de ser quantificado. Com este equipamento é possível quantificar o PFC no ar em concentrações muito baixas, em partes por quadrilhão.

As imagens dos equipamentos, Figuras 42 e 43, estão no Anexo 2.

### **3.2.5 Procedimento para localização do vazamento**

A proposta a seguir foi definida a partir de experimentos realizados em campo nos anos 2011 e 2012, na CTEEP, sendo que é possível realizar pequenas alterações, a fim de adequá-la para todas as situações. Cada localização de vazamento de óleo em cabo OF é uma experiência única, ou seja, as condições nunca são as mesmas.

- 1- Após injetar PFC no trecho hidráulico do cabo subterrâneo com vazamento a ser localizado, o mesmo deve ser mapeado e dividido em trechos de 40 m de comprimento. Caso o trecho hidráulico total seja menor ou igual a 1000 m, pular para a etapa 4;
- 2- Nos pontos mapeados a cada 40 m, deve ser coletado o ar próximo à superfície do solo e estas amostras de ar devem ser enviadas ao laboratório químico para análise e quantificação do PFC;

- 3- Com o resultado das análises das amostras de ar a cada 40 m, deve ser definido o trecho com maior concentração de PFC, com comprimento aproximado de 1000 m;
- 4- O trecho com comprimento aproximado de 1000 m deve ser dividido em trechos de 20 m;
- 5- Nos pontos mapeados a cada 20 m, deve ser coletado o ar próximo à superfície do solo e estas amostras de ar devem ser enviadas ao laboratório químico para análise e quantificação do PFC;
- 6- Com o resultado das análises das amostras de ar a cada 20 m, deve ser definido o trecho com maior concentração de PFC, com comprimento aproximado de 200 m;
- 7- O trecho com comprimento aproximado de 200 m deve ser dividido em trechos de 4 m;
- 8- Nos pontos mapeados a cada 4 m, deve ser coletado o ar no solo a cerca de 30 cm de profundidade. Deverão ser realizados furos no solo para a amostragem do ar e envio ao laboratório químico para análise e quantificação do PFC;
- 9- Com o resultado das análises, pode ser definido o local do vazamento de óleo do cabo subterrâneo.

A Figura 23 mostra a configuração para injeção de PFC no cabo OF com vazamento de óleo LAB.

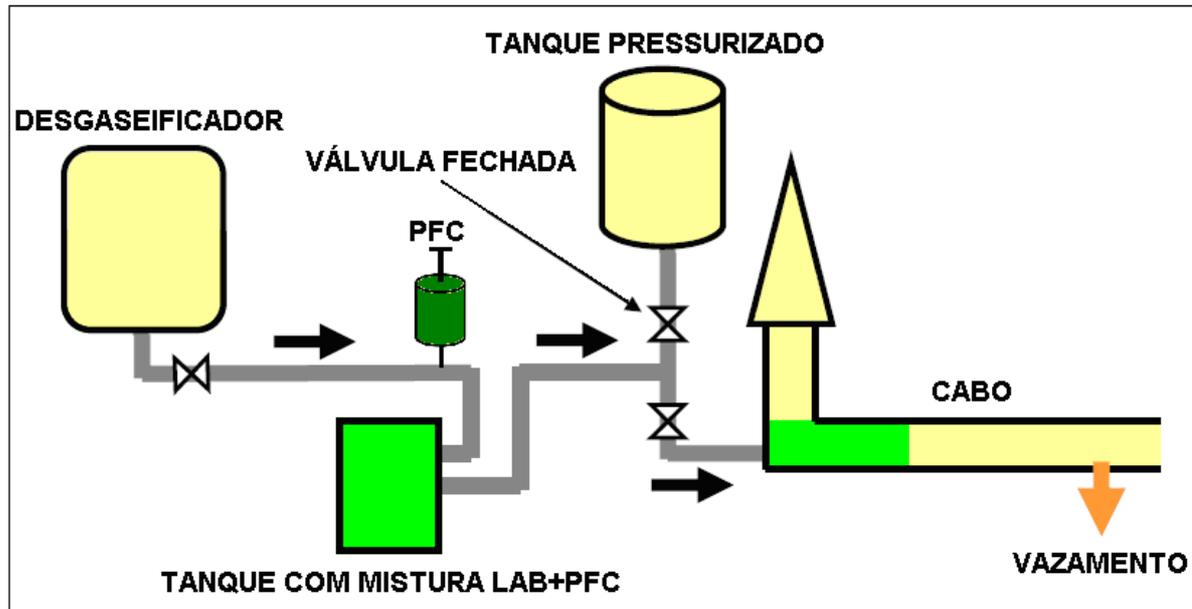


Figura 23 – Sistema de injeção do PFC no cabo OF.

### 3.3 Ensaios experimentais - método do PFT

#### 3.3.1 Ensaios físico-químicos das soluções de perfluorcabono (PFC) em óleo linear alquilbenzeno (LAB)

Foram preparadas soluções de PFC em LAB nas concentrações de 1000 ppm (m/m), 100 ppm (m/m) e 10 ppm (m/m). As soluções foram preparadas nestas concentrações pois a intenção era de se usar entre 10 ppm (m/m) e 100 ppm (m/m) nos cabos OF, sendo que a concentração de 1000 ppm (m/m) serviu para investigar qual a ação do PFC em concentrações 10 vezes maior do que o limite máximo de utilização nos cabos OF. Em seguida estas foram analisadas no laboratório da empresa MGM Óleos Isolantes, na cidade de Campinas, e os resultados obtidos nos ensaios são dados na Tabela 3.

Tabela 3– Resultados de ensaios em soluções de PFC em óleo LAB. Fonte: Adaptado de ALMEIDA, D. M. et al, 2011.

Ensaio	Unidade	Método	Óleo LAB + PFC 1000 ppm	Óleo LAB + PFC 100 ppm	Óleo LAB + PFC 10 ppm
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	136	138	140
Ponto de Combustão	°C	NBR 11341	142	144	148
Rigidez Dielétrica	kV/2,5mm	NBR 10859	65,0	70,0	70,0
Índice de Neutralização	mg KOH/g óleo	NBR 14248	0,01	0,01	0,01
Tensão Interfacial	mN/m	NBR 6234	39,7	39,3	39,0
Viscosidade 40°C	cSt	NBR 10441	5,26	5,27	5,15
Densidade	g/mL	NBR 7148	0,862	0,862	0,862
Fator de Potência 100°C	%	NBR 12133	0,16	0,20	0,16
Resistividade Volumétrica	1E9 $\Omega$ m	NBR 12133	716	621	640

### 3.3.2 Medições de PFC em amostras de óleo LAB

Foi montado um sistema de injeção de óleo para avaliação da estabilidade do teor de PFC, contendo tanque, válvulas e tubos de chumbo, onde foi realizada a mistura, conforme ilustrado na Figura 24.

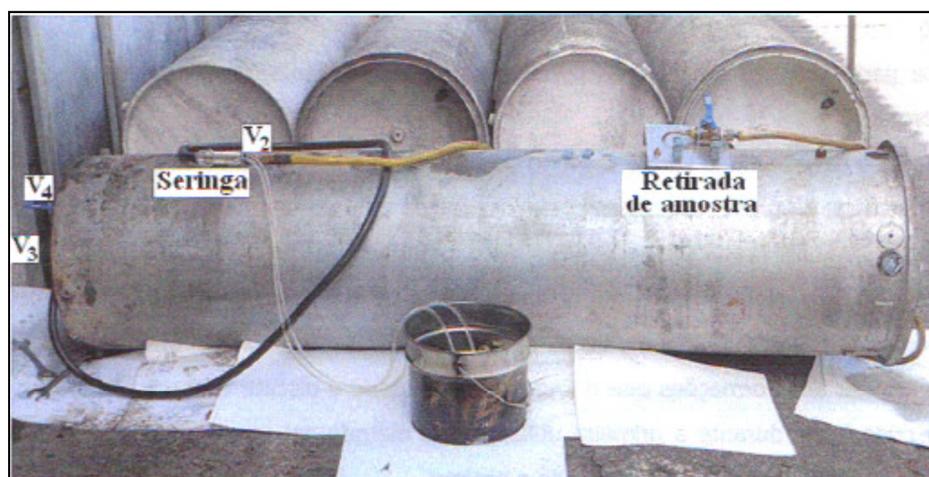


Figura 24 – Sistema de injeção do PFC no óleo LAB. Fonte: ALMEIDA, D. M. et al, 2011.

Para a realização deste teste, foram aplicados 45 ml de PFC, o que representa em massa 620 ppm (m/m) ou 0,062% de concentração de PFC nos 150 litros de óleo LAB, que é a capacidade máxima do tanque. Foi escolhida esta concentração de PFC por ser ligeiramente superior ao valor que seria utilizado no protótipo de cabo 345 kV, citado na seção 3.3.4.

Após terminada a mistura de PFC com óleo, foi retirada a primeira amostra do tanque. Depois, foram retiradas quatro amostras em intervalos de uma hora a cada retirada. A sexta amostra foi retirada 24 h após o término da injeção. Finalmente, foram retiradas mais duas amostras, sendo uma após 3 dias e a última após rolar o tanque várias vezes para melhorar a homogeneização da mistura dentro dele. As 8 amostras da mistura foram enviadas para o laboratório DIAGNO para análise cromatográfica das concentrações de PFC no óleo LAB. Para estas análises foi utilizado um cromatógrafo gasoso com detector de ionização em chama e um injetor automático do tipo “headspace”, onde uma seringa com acionamento automatizado retira a amostra de um frasco de 2 ml e injeta no cromatógrafo.

Os resultados das análises cromatográficas estão indicados na Figura 25 e são objetos de discussão na seção 3.4.

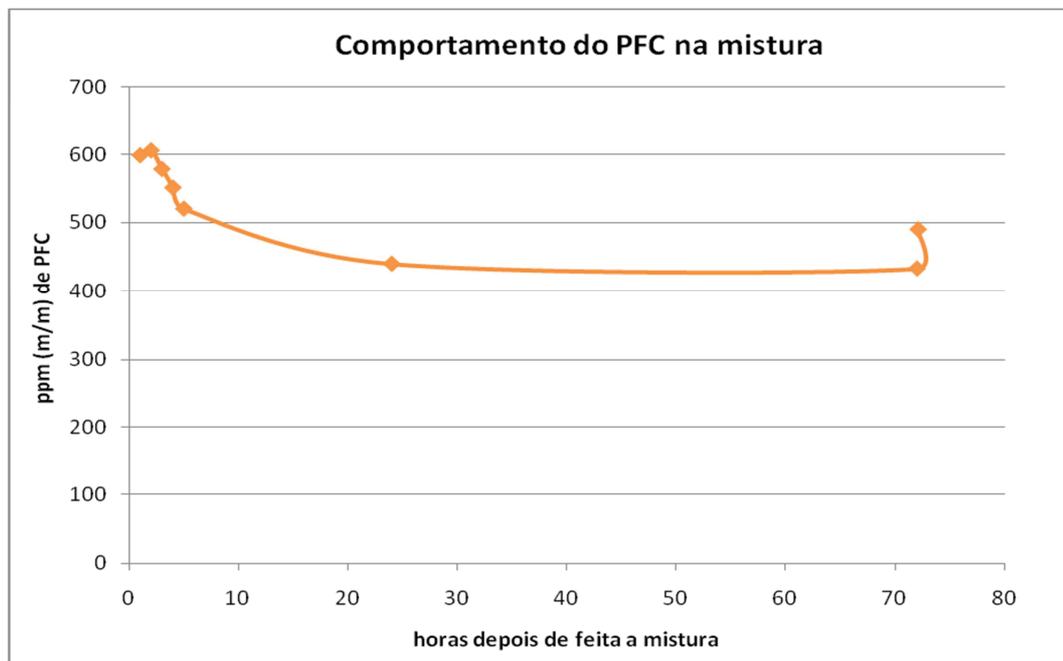


Figura 25 - Concentração de PFC presente no óleo do tanque pressurizado.

### 3.3.3 Medições de PFC em amostras de ar

Foi realizado o ensaio de localização de traços de gás PFC onde foi simulado um vazamento de óleo com a vazão de 160 mililitros por hora. No decorrer da pesquisa, este ensaio foi realizado duas vezes, apresentando resultados similares.

Em um tanque pressurizado foi preparada a mistura PFC-LAB com cerca de 20 ppm de PFC em massa.

Foi feito um buraco com 50 cm de diâmetro e 1 m de profundidade para simular a vala onde os cabos são enterrados.

Foi colocado no fundo do buraco uma camada de cerca de 50 cm de areia compactada. O tubo de chumbo que simulou o vazamento ficou com seu ponto de vazamento no centro da camada de areia.

A parte superior do buraco foi coberta com o próprio solo natural retirado. O mesmo também foi compactado, conforme Figura 26:

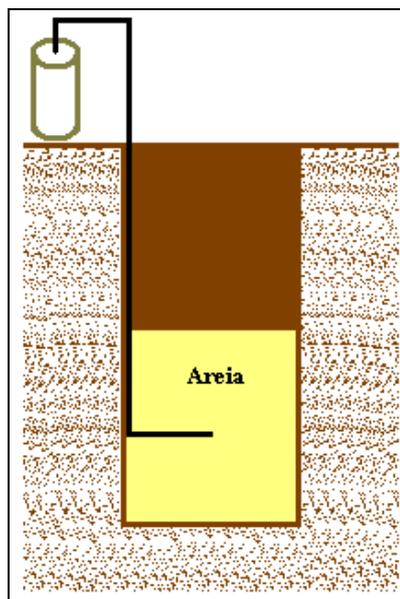


Figura 26 - Buraco no solo para simulação de vazamento.

Antes de ser iniciada a simulação de vazamento foi coletada uma amostra de ar no local para servir de referência “background” para as análises posteriores.

Durante a simulação de vazamento o fluxo vazante cessou devido à compactação das camadas de areia e solo natural e foi decidido dar continuidade na simulação do vazamento colocando o tubo de chumbo sobre a superfície, conforme mostra a Figura 27:

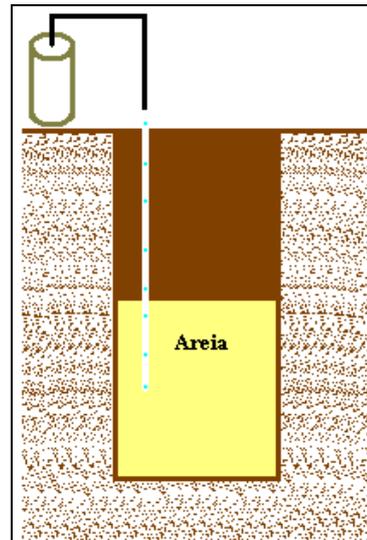


Figura 27 - Adaptação para continuidade na simulação de vazamento.

Foram realizadas duas séries de coleta de amostras, sendo a primeira série no solo e a segunda série no ar, ambas dois dias após o início da simulação do vazamento. No solo foram coletadas 3 amostras, conforme Figura 28:

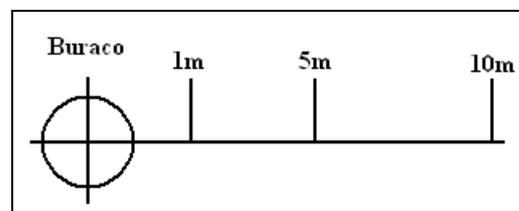


Figura 28 - Croqui dos pontos de coleta de amostra no solo.

No ar foram coletadas 7 amostras, conforme Figura 29:

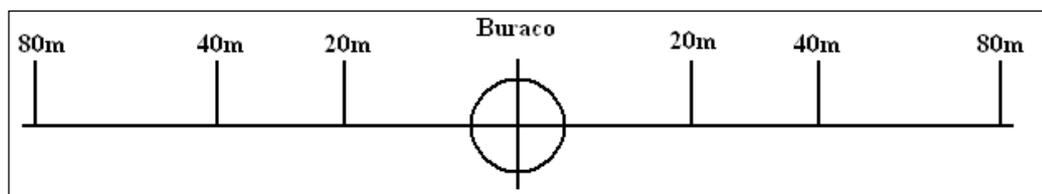


Figura 29 - Croqui dos pontos de coleta de amostra no ar.

A Figura 30 mostra a coleta de ar na superfície do solo, utilizando-se uma bomba de amostragem de ar com tubo pré concentrador de vapores, conforme citado na seção 3.2.3 desta dissertação. A Figura 31 mostra a coleta sendo realizada no solo:



Figura 30 - Coleta de PFC no ar.



Figura 31 - Coleta de PFC no solo.

Depois de coletadas, todas as amostras foram enviadas para análise no laboratório da Environ, em São Paulo, que apresentou os resultados da Tabela 4. As análises foram realizadas em um cromatógrafo gasoso com detector de captura de elétrons e dessorvedor térmico, conforme indicado na seção 3.2.4 desta dissertação.

Tabela 4 - Resultados das amostras analisadas na Environ.

Tipo de Coleta	Local	Data da Coleta	Hora de Início da Coleta (hh:mm)	Volume de ar coletado (l)	PFC quantificado (ng)
Referência	0a	17/05/2012	15:00	72	0,3
Coleta no solo	S1	18/05/2012	07:40	72	189,3
Coleta no solo	S5	18/05/2012	07:40	72	7
Coleta no solo	S10	18/05/2012	07:40	72	0,1
Coleta no ar	-80	18/05/2012	12:00	72	0,3
Coleta no ar	-40	18/05/2012	12:00	72	0,6
Coleta no ar	-20	18/05/2012	12:00	72	0,7
Coleta no ar	0d	18/05/2012	12:00	72	12
Coleta no ar	20	18/05/2012	12:00	72	0,3
Coleta no ar	40	18/05/2012	12:00	72	0,5
Coleta no ar	80	18/05/2012	12:00	72	0,4

A Figura 32 indica em forma de gráfico os resultados da coleta no ar. “0d” é o ponto zero onde foi introduzido o PFC e os demais números são as distâncias em metros a esse ponto.

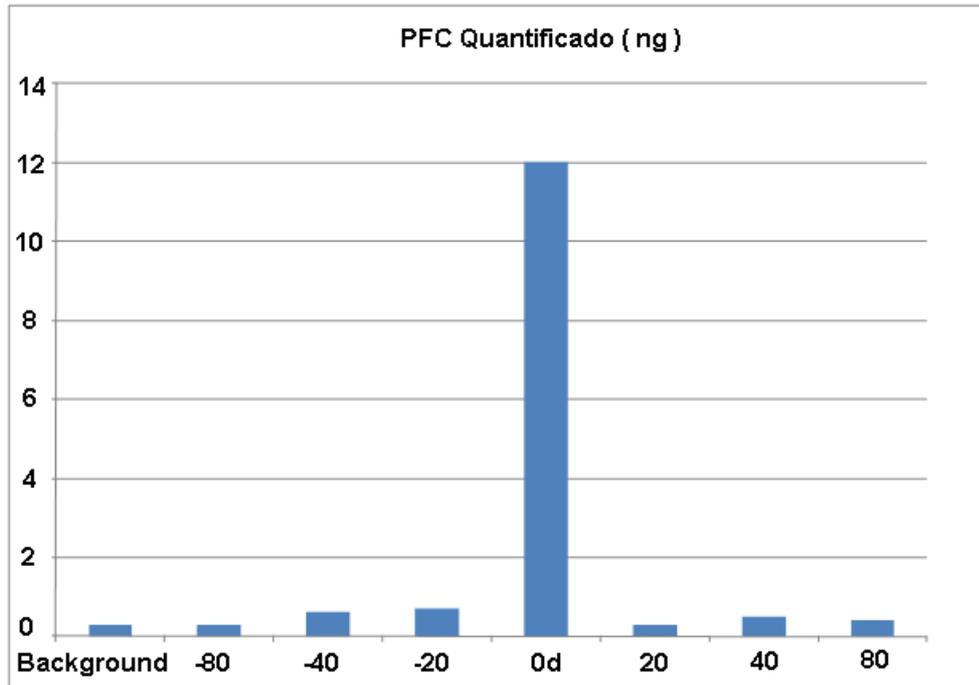


Figura 32 - Quantificação de PFC no ar.

A Figura 33 indica em forma de gráfico os resultados da coleta no solo. “S<sub>1</sub>” é a uma distância de 1 m do ponto zero e os demais pontos são a “S<sub>5</sub>”=5 m e “S<sub>10</sub>”=10 m.

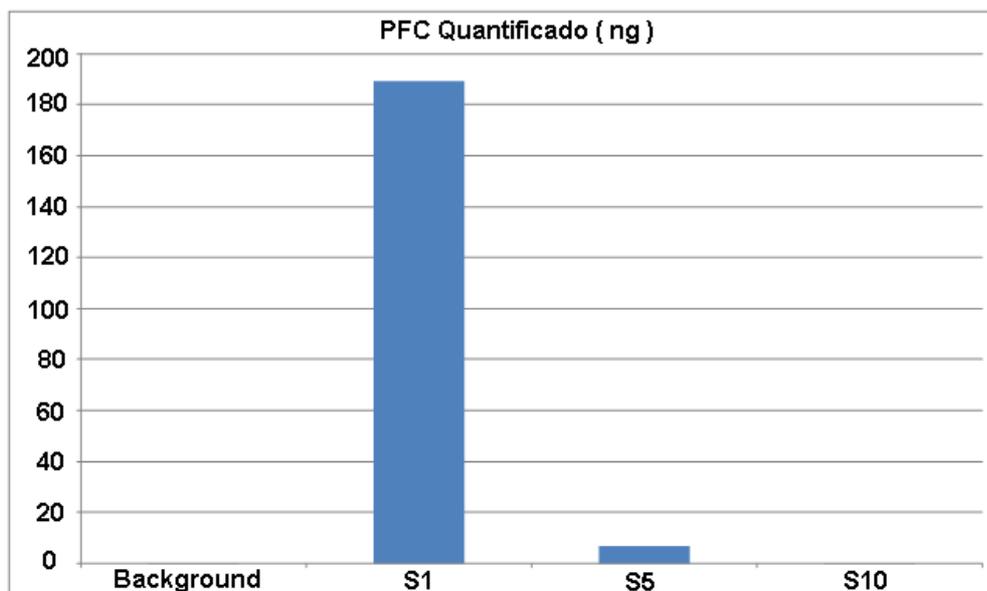


Figura 33 - Quantificação de PFC no solo.

### 3.3.4 Teste de tensão aplicada em protótipo

O teste de tensão aplicada no protótipo foi necessário a fim de homologar a utilização da mistura LAB + PFC no cabo OF de 345 kV. O objetivo foi comprovar que o PFC não prejudica a isolação do cabo OF. O cabo utilizado no teste é de fabricação PIRELLI e possui isolação para 345 kV, condutor de cobre 630 mm<sup>2</sup> e blindagem metálica de alumínio corrugado.

A Figura 34 mostra o protótipo contendo 30 m de cabo OF e 2 terminais de 345 kV, que foram montados na subestação Milton Fornasaro, da CTEEP, em São Paulo. A sequência de fotos da montagem do protótipo está no Anexo 5 desta dissertação. O óleo do protótipo foi dopado com PFC na concentração de 600 ppm.



Figura 34 - Protótipo contendo 30 m de cabo OF e 2 terminais de 345 kV.

Depois de terminado o tratamento do óleo LAB e a mistura do PFC no protótipo, foi realizado o teste de tensão aplicada para a homologação do funcionamento do mesmo.

Para esse experimento foi utilizada a fonte ressonante móvel da CTEEP indicada na Figura 44 e a equipe especializada na operação dessa fonte veio da CTEEP-Bauru para realizar a prova.

A prova consistiu em aplicar durante 15 min a tensão fase-terra de 280 kV em corrente alternada. O método usado para chegar a essa tensão foi o de aplicar inicialmente 40 kV e ir subindo degraus de 20 kV a cada minuto, até que a tensão máxima de 280 kV fosse atingida e permanecesse assim por 15 min. A Figura 45 mostra o painel de controle da fonte ressonante.

O tempo e a tensão aplicada foram definidos de acordo com os valores apresentados nas normas IEC 62067 e IEC 60141-1.

A Figura 46 indica o diagrama de blocos da montagem utilizada no teste de tensão aplicada.

A Figura 47 mostra o divisor capacitivo e os 2 reatores utilizados na prova de tensão aplicada.

As Figuras 45, 46 e 47 estão no Anexo 3.

Terminados os 15 min não foi constatado nenhum problema no protótipo, sendo que a corrente máxima de teste chegou a 0,9 A.

Em seguida, a tensão aplicada foi reduzida para 210 kV e mantida durante 24 h. Não foi observado nenhum problema e a corrente máxima do teste com 210 kV chegou a 0,7 A, o que determinou a homologação do funcionamento do protótipo.

Este ensaio foi realizado em ambiente com temperatura de 19,8°C e umidade relativa do ar 74%. Os resultados da prova de tensão aplicada estão apresentados na Tabela 5 do Anexo 3.

### **3.4 Discussões - método do PFT**

Como complementação ao método de congelamento, foi explorado o método do PFT, que é mais adequado para os casos onde há pequenos vazamentos nas soldas das emendas enterradas, ou nos casos de corrosão da blindagem metálica, seguida de pequenos vazamentos de óleo.

O método do PFT pode localizar vazamentos de óleo a partir de 100 litros por mês e o tempo estimado para a localização é de 30 dias, levando-se em consideração o tempo para injeção do PFC, coletas de ar e análises em laboratório

químico. Porém a linha subterrânea poderá estar energizada e não são realizadas escavações, exceto no momento de confirmar o local exato e realizar o reparo.

No exterior, a metodologia do PFT utiliza-se de um laboratório móvel, sendo que esta dissertação discorre sobre uma metodologia baseada em coleta de amostras de ar para análise em um laboratório afastado do local de coleta.

Analisando a Tabela 3 da seção 3.3.1, verifica-se que as misturas PFC+LAB apresentadas não sofreram alterações significativas em relação às características físico-químicas, se comparado com o óleo LAB puro.

Analisando a Figura 25 da seção 3.3.2, verifica-se que mesmo dentro do tanque ocorre uma perda do PFC com o tempo, todavia tendendo a uma estabilização. No caso presente, a estabilização do teor de PFC no óleo foi de 72% do teor inicial quando em repouso e de 82% se agitado (rolar o tambor). Então para o uso do óleo + PFC no campo é conveniente que isso ocorra logo após a preparação da mistura e que o tambor seja agitado antes da transferência para o cabo.

Analisando a Tabela 4 e as Figuras 32 e 33 da seção 3.3.3, é possível afirmar que quando a amostra é coletada junto ao ponto de vazamento realmente a concentração de PFC é muito grande. A medida que se afasta os valores diminuem, mas para coleta no ar, até cerca de 40 m os resultados são pelo menos o dobro da referência "background". Na Figura 32 também é possível verificar que as concentrações de PFC encontradas nas distâncias de 40 m e 80 m foram maiores do que a encontrada em 20 m. Uma suposição para estes resultados é que o vento pode ter provocado a movimentação do PFC no ar. As coletas de ar no solo indicaram que o PFC foi encontrado até cerca de 5 m.

As amostras coletadas no solo a 10 m de distância ou no ar acima de 40 m de distância já não evidenciam claramente a existência de pontos de vazamentos próximos.

Dessa maneira deve-se utilizar para as coletas de ar uma distância inicial de 40 m entre pontos de coleta e para o solo 4 m.

As condições climáticas não foram levadas em consideração nos testes descritos nesta dissertação, porém se forem consideradas é possível que os resultados desta metodologia sejam ainda mais precisos.

Em relação ao teste de tensão aplicada, o cabo com óleo LAB + PFC em concentração de 600 ppm foi aprovado no teste.

A fim de compor o custo médio de uma localização de vazamento de óleo pelo método do PFT, podem ser considerados os seguintes gastos (estimados):

- 1- Análises químicas (100 análises) para quantificação de PFC = R\$30.000,00;
- 2- Homem x hora (300 Hxh) de técnicos de manutenção em cabos subterrâneos para preparação da mistura, injeção do óleo no cabo e coleta de ar para envio ao laboratório= R\$13.500,00;
- 3- Transporte e materiais de consumo = R\$10.000,00.

TOTAL = R\$53.000,00.

## 4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 4.1 Conclusões

O trabalho apresentou a proposição de dois métodos de localização de vazamentos de óleo em cabos isolados do tipo OF.

Uma análise aproximada revela que o método do congelamento é cerca de cinco vezes mais rápido do que o método do PFT para localizar um vazamento de óleo, porém é cerca de duas vezes mais caro.

Com o modelo teórico para o método do congelamento, é possível fazer um planejamento do teste sem inconveniências e surpresas de uma metodologia com tentativas e erros normalmente utilizada.

O modelo teórico apresentado permite o cálculo simplificado do tempo de congelamento para cabos OF, além de comprimentos otimizados para as câmaras de congelamento.

Tomando como base o modelo, foram apresentadas curvas de aplicação para cabos OF de 138, 230 e 345 kV, as quais podem ser utilizadas para definir o melhor tamanho da câmara de congelamento, assim como para estimar o tempo do teste, que é uma informação fundamental quando desligam-se linhas subterrâneas em grandes cidades.

Verificou-se que ao se reduzir o comprimento da câmara de congelamento, para um mesmo fluxo de óleo interno ao cabo no ponto de congelamento, elevou-se o tempo de congelamento, acompanhado de aumento de erro de previsão. Por outro lado, verifica-se que não é vantajoso aumentar o comprimento da câmara acima de determinados valores, a partir dos quais observa-se uma saturação do efeito de redução no tempo de congelamento.

As curvas de aplicação simuladas podem ser utilizadas para definir as condições adequadas para o processo de congelamento de cabos OF típicos 138, 230 e 345 kV e o modelo teórico pode ser aplicado a qualquer classe de tensão de cabos OF.

Nesta dissertação foram apresentadas as primeiras experiências no Brasil com traçador perfluorcarbono para localizar vazamentos de óleo de cabos OF.

Os experimentos e testes apresentados foram realizados em ambiente controlado, de forma que ainda são necessários casos reais de vazamento para aplicação da metodologia.

Através do teste de tensão aplicada no protótipo de cabo OF 345 kV, foi possível constatar que misturas PFC+LAB em concentrações de até 600 ppm (m/m) podem ser injetadas nos cabos OF sem causar danos nos mesmos, sendo que concentrações a partir de 20 ppm já são suficientes para localizar vazamentos de óleo.

Os resultados das localizações de vazamento em ambiente controlado indicaram que o método do PFT foi eficiente para coletas de ar na superfície do solo a 40 m e no subsolo a 4 m de distância em relação ao ponto de vazamento. O procedimento é promissor e merece sua exploração em ambientes não controlados.

A utilização da metodologia do PFT no exterior (Canadá, USA e Inglaterra) já é bastante comum para localizar vazamentos de óleo de cabos OF. No Brasil, entretanto, este procedimento ainda não é utilizado e este trabalho apresenta uma análise experimental pioneira, a ser aprofundada em etapa posterior com um caso real de vazamento de óleo em cabo OF.

## **4.2 Perspectivas futuras**

Em relação ao método do congelamento, ainda é possível aferir o modelo teórico através de mais dados experimentais de congelamento. Tais dados podem ser adquiridos através da construção de um protótipo para as simulações, com cerca de 5 m de cabo OF, instrumentação para medição de fluxos de óleo e câmaras de congelamento em tamanhos variando entre 1 m e 1,5 m.

Quanto ao método do PFT, pode-se buscar o desenvolvimento de dois equipamentos portáteis a fim de otimizar este processo de localização de vazamentos.

O primeiro equipamento seria utilizado no preparo da mistura e injeção do óleo dopado com PFC no cabo.

O segundo equipamento seria utilizado para realizar a coleta e análise do ar “in loco”, ao longo do itinerário do cabo subterrâneo com vazamento de óleo.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. M. et al. Instrução para realização da mistura do PFC com óleo LAB - **Anexo 1**. In:Relatório do mês 8 / ano 2- P&D ANEEL 0068-0001/2009. São Paulo, 2011.
- ANRCP - Amarillo National Resource Center for Plutonium. **Use of sulfur hexafluoride and perfluorocarbon tracers in plutonium storage containers for leak detection**. ANRCP-1998-4, 1998. 80 p.
- BIOS International Corporation. Disponível em: <[http://www.biosint.com/pdf/Bios\\_Defender\\_Brochure.pdf](http://www.biosint.com/pdf/Bios_Defender_Brochure.pdf)>. Acesso em: mar, 2012.
- CCBDA - Canadian Copper and Brass Development Association. Disponível em: <<http://coppercanada.ca/publications/pub21e/21e-section6.htm>>. Acesso em: set, 2011.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa**: uma abordagem prática. São Paulo: McGraw-Hill, p. 150-151, 2009.
- CROUCHER, A. EDF Energy Networks. The Future of Cable Leak Location. In: **ENA-EA Joint FFC Workshop**, <http://www.energynetworks.org>, 2008.
- DIETZ, N.; SENUM, G. Detection of interstate liquids pipeline leaks: feasibility evaluation. **Bnl-65970 – informal report**, 1998. 14 p.
- EPA TO-17. **Determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes**. Local: “EPA”, 1997.
- EPRI. **Condenser leak detection by using SF6 as a tracer gas**. RP1689, 1988.
- EPRI. **HPFF cable leak location using perfluorocarbon tracers**. TR-109086 7905-01, 1997. 135 p.
- FAIRHURST, M.; KEELAN, P. Oil filled cable leak location using PFT (Perfluorocarbon tracing) - Non-intrusive oil filled cable leak location, In: **JICABLE'11**, França, 2011.

- GHAFFURIAN, R. et al. Leak location in fluid filled cables using the PFT method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 1, p. 18-22, 1999.
- GRIMONI, J. A. B., et al. Desenvolvimento de um sistema de localização de falhas das capas plásticas e vazamentos de óleo em cabos subterrâneos. **Relatório final - P&D ANEEL 0068-09/2006 (A7) ciclo II**. São Paulo, 2009.
- HALL, R. E.; CHEVRAY, R. Freezing of low and medium viscosity pipe type cable filling oils. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**. v. 94, n. 6, p. 1994 – 2001, 1975.
- HEISER, J. et al. Long-term verification of cover systems using perfluorocarbon tracers. **BNL-74670-2005-JA**, 2004. 29 p.
- HEISER, J. et al. Using gaseous perfluorocarbon tracers to characterize leak pathways in the bellow grade ducts of the Brookhaven Graphite research reactor. In: **WM'01 Conference**, USA, 2001. Disponível em: <<http://www.wmsym.org/archives/2001/10A/10A-17.pdf>>. Acesso em: out, 2011.
- HASSOUN, S. et al. Development of perfluorocarbon tracer technology for underground leak location. **J. Environ. Monit.**, v. 2, p. 432-435, 2000.
- ICHIYANAGI, N. et al. (The Furukawa Electric Co). The freezing method for the oil stop in POF cable repair. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-98, n. 6 Nov/Dec 1979.
- IEC 60141-1. **Tests on oil filled and gas pressure cables and their accessories – part 1: oil filled, paper-insulated, metal-sheathed cables and accessories for alternating voltages up to and including 400 kV**. Local: IEC, 1993.
- IEC 62067. **Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (UN=170 kV) up to 500 kV (UN=550 kV) – Test methods and requirements**. Local: IEC, 2011.
- ISO 16017. **Indoor, ambient and workplace air - sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography - part 2: diffusive sampling**. Local: ISO, 2003.
- MARKES International. Disponível em: <<http://www.markes.com/Instrumentation/UNITY.aspx>>. Acesso em: mar, 2012.

MERRELL, E. J. Freezing oil-type pipe cables. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**. Power Apparatus and Systems, Part III. v. 74, p. 1023 – 1034, 1955.

SHORT, C. M.; BEST, R. J. Freezing pipe-type cable oil with liquid nitrogen. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**. v. PAS-87, c. 12, p. 1995 – 2002, 1968.

SIGMA ALDRICH. Disponível em: <<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/ALDRICH/282316?lang=pt&region=BR>>. Acesso em: set, 2011.

SULLIVAN, T. et al. Use of perfluorocarbon tracer (PFT) technology for subsurface barrier integrity verification at the Waldo test site. **Informal report**, 1999. 24 p.

THERMO SCIENTIFIC. Disponível em: <[http://www.thermoscientific.com/ecommerce/servlet/productsdetail\\_11152\\_\\_\\_11961325\\_-1](http://www.thermoscientific.com/ecommerce/servlet/productsdetail_11152___11961325_-1)>. Acesso em: nov, 2012.

TRACER DETECTION TECHNOLOGY CO. Identification and testing of available sensors for the detection of perfluorocarbon. **Resumo Técnico**, 2002. 15 p.

TRACER DETECTION TECHNOLOGY CO. Identification and testing of available sensors for the detection of perfluorocarbon. **Relatório final**, n. 197719, 2002. 15 p.

TYLMAN, W.; ANDERS, G. Novel leak detection systems for pipe type cable installations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 03, p. 1028-1034, 2006.

WHITE MARTINS. Ficha de informações de segurança de produto químico - produto: **HALOCARBONO 116**. [s.l.]: White Martins, 2002. Disponível em: <<http://www.whitemartins.com.br/site/catalogo/fispq/P4670D.pdf>>. Acesso em: nov, 2012.

## **ANEXOS**

## 1 Registro dos congelamentos

- **Primeiro congelamento**

O primeiro congelamento registrado nesta dissertação foi realizado no dia 22/11/2008 às 20:30 h, conforme demonstrado na Figura 35, e o óleo demorou cerca de 04:00 h para congelar totalmente utilizando uma câmara de cerca de 1 m de comprimento.

A temperatura do óleo no ponto do vazamento estava próximo de 45°C.

O fluxo de óleo no ponto do congelamento estava próximo de (4,0 l/h).

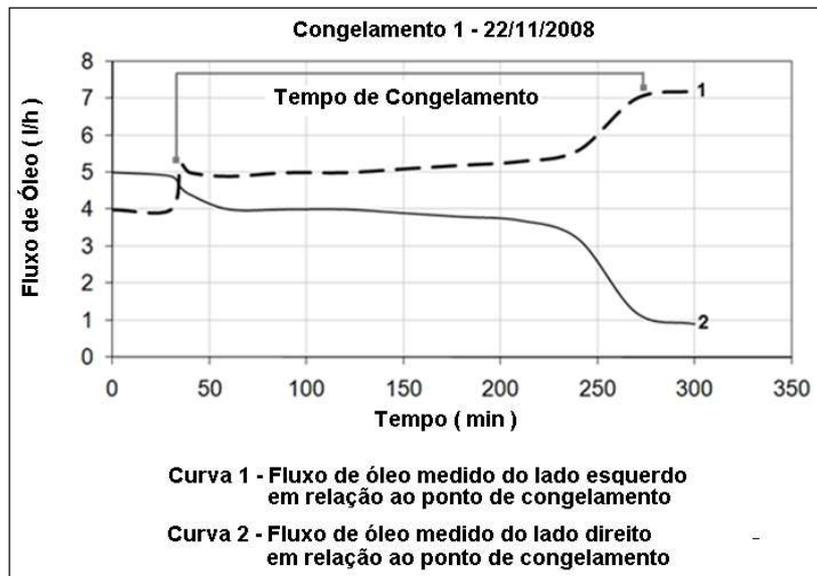


Figura 35 – Primeiro congelamento da linha XAV-BAN (22/11/2008).

- **Segundo congelamento**

O segundo congelamento registrado nesta dissertação foi realizado no dia 23/11/2008 às 10:00 h, conforme demonstrado na Figura 36, e o óleo demorou cerca de 04:00 h para congelar totalmente utilizando uma câmara de cerca de 1 m de comprimento.

A temperatura do óleo no ponto do vazamento estava próximo de 45°C.

O fluxo de óleo no ponto do congelamento estava próximo de (4,0 l/h).

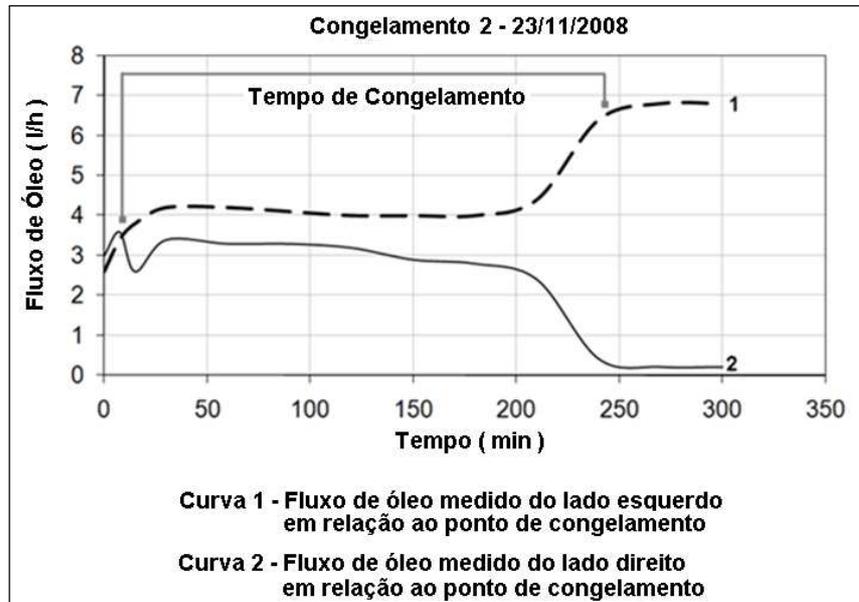


Figura 36 – Segundo congelamento da linha XAV-BAN (23/11/2008).

- **Terceiro congelamento**

O terceiro congelamento também foi realizado no dia 23/11/2008 às 19:00 h, conforme demonstrado na Figura 37, e o óleo demorou cerca de 03:30 h para congelar totalmente utilizando uma câmara de cerca de 1 m de comprimento.

A temperatura do óleo no ponto do vazamento estava próximo de 45°C.

O fluxo de óleo no ponto do congelamento estava próximo de (4,0 l/h).

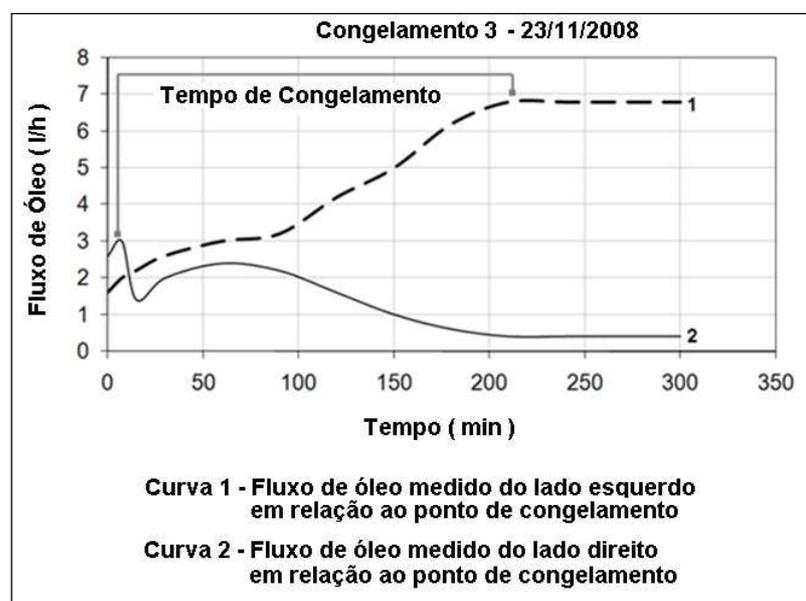


Figura 37 – Terceiro congelamento da linha XAV-BAN (23/11/2008).

- **Quarto congelamento**

O quarto congelamento registrado nesta dissertação foi realizado no dia 01/05/2010 às 07:00 h, conforme demonstrado na Figura 38, e o óleo demorou cerca de 02:00 h para congelar totalmente utilizando uma câmara de cerca de 1 m de comprimento.

A temperatura do óleo no ponto do vazamento estava próximo de 65°C.

O fluxo de óleo no ponto do congelamento estava próximo de (1,0 l/h).

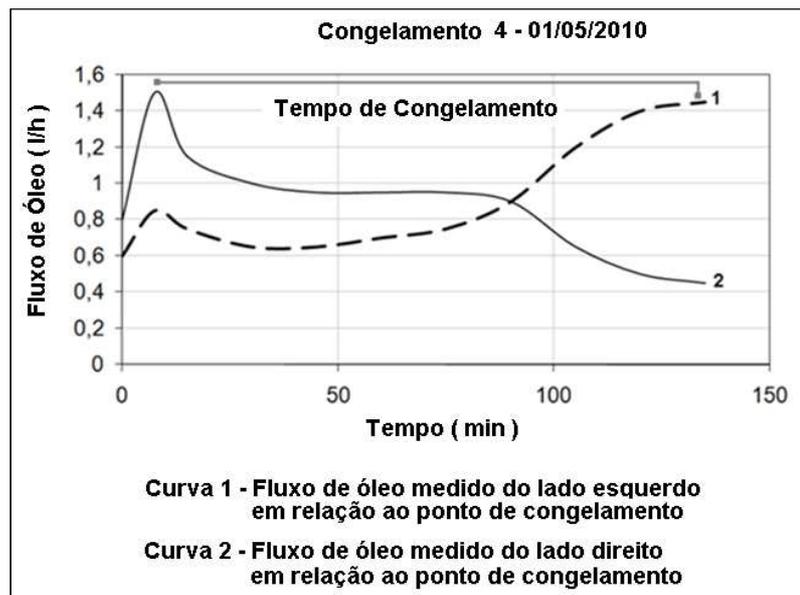


Figura 38 - Quarto congelamento da linha XAV-BAN (01/05/2010).

- **Quinto congelamento**

O quinto congelamento registrado nesta dissertação foi realizado no dia 02/05/2010 às 08:00 h, conforme demonstrado na Figura 39, e o óleo demorou cerca de 01:50 h para congelar totalmente utilizando uma câmara de cerca de 1 m de comprimento.

A temperatura do óleo no ponto do vazamento estava próximo de 65°C.

O fluxo de óleo no ponto do congelamento estava próximo de (1,0 l/h).

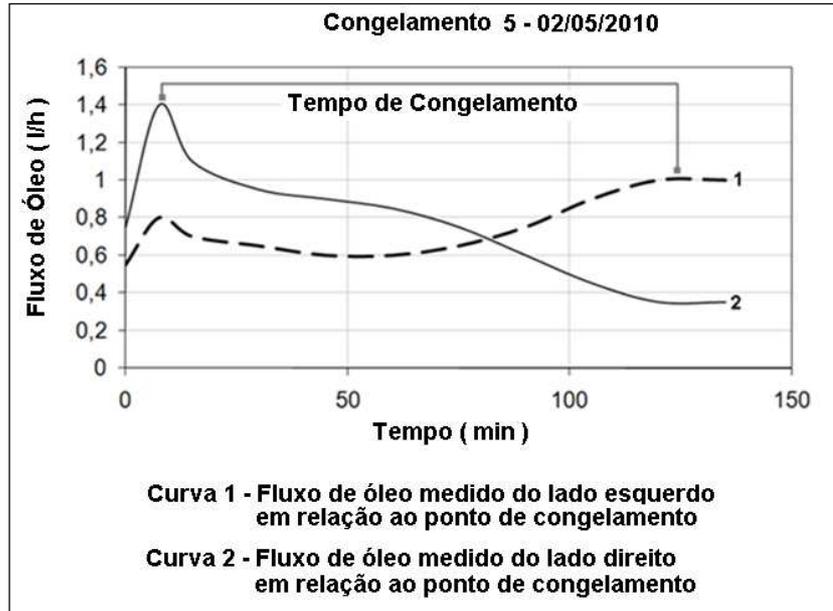


Figura 39 - Quinto congelamento da linha XAV-BAN (02/05/2010).

## 2 Equipamentos utilizados no método do PFT



Figura 40 – Bomba de amostragem de ar de baixa vazão.



Figura 41 - Calibrador para bomba de amostragem de ar de baixa vazão. Fonte: BIOS, 2012.



Figura 42 -Cromatógrafo gasoso com detector ECD. Fonte: THERMO SCIENTIFIC, 2012.



Figura 43 - Dessorvedor térmico. Fonte: MARKES, 2012.

### 3 Ensaio de tensão aplicada no protótipo de 345 kV.



Figura 44 - Fonte Ressonante Móvel de 800 kV.



Figura 45 - Painel de controle da fonte ressonante.

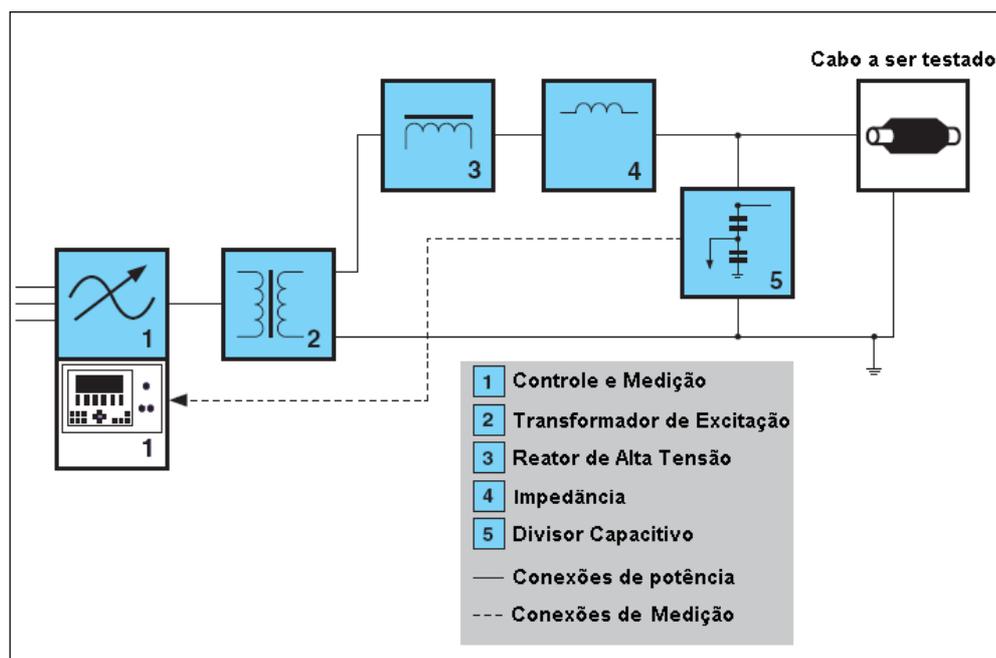


Figura 46—Diagrama de blocos do teste de tensão aplicada.



Figura 47 - Divisor capacitivo e reatores utilizados na prova de tensão aplicada.

Tabela 5 – Resultados da prova de tensão aplicada em protótipo de cabo OF.

Tensão de teste(kV)	Tempo (min)	Frequência de teste (Hz)	Corrente capacitiva (A)	Situação do teste
40	1	124,65	0,10	APROVADO
60	1	124,78	0,20	APROVADO
80	1	124,78	0,30	APROVADO
100	1	124,76	0,30	APROVADO
120	1	124,76	0,40	APROVADO
140	1	124,76	0,40	APROVADO
160	1	124,75	0,50	APROVADO
180	1	124,74	0,60	APROVADO
200	1	124,72	0,60	APROVADO
220	1	124,71	0,70	APROVADO
240	1	124,68	0,80	APROVADO
260	1	124,67	0,80	APROVADO
280	15	124,64	0,90	APROVADO
210	1440	124,68	0,70	APROVADO

#### 4 Fotos demonstrando as etapas de um congelamento.



Figura 48 – Sinalização do ambiente de trabalho.



Figura 49 – Fluxímetros digitais.



Figura 50 – Notebook com software de aquisição de dados.



Figura 51 – Escavação para acesso ao cabo subterrâneo.



Figura 52 – Preparação do cabo para congelamento.



Figura 53 – Colocação de nitrogênio líquido na câmara de congelamento.



Figura 54 – Cabo congelado.



Figura 55 - Aplicação de fitas após o congelamento.



Figura 56 – Compactação de areia média lavada em vala.



Figura 57 – Compactação de terra em vala.



Figura 58 – Colocação de bica corrida em vala.



Figura 59 – Reconstituição do asfalto.



Figura 60 – Reconstituição da pintura da via.

**5 Fotos da montagem do protótipo para teste de tensão aplicada.**



Figura 61 - Local onde o protótipo foi montado.



Figura 62 - Fixação de torre metálica.



Figura 63 - Cabo posicionado.



Figura 64 - Preparação de materiais para montagem do terminal.



Figura 65 - Início de aplicação dos papéis.



Figura 66 - Aplicação dos últimos papéis.



Figura 67 - Posicionamento do cone defletor de campo.



Figura 68 - Papéis abaixo do cone defletor de campo sendo preparados.



Figura 69 - Papéis acima do cone defletor de campo sendo preparados.



Figura 70 - Preparação da ponta do cabo.



Figura 71 - Conector fixado no condutor de cobre



Figura 72 - Ponta do cabo recebendo banho de óleo LAB.



Figura 73 - Cone defletor finalizado recebendo banho de óleo LAB.



Figura 74 - Porcelana sendo levada até a base do terminal.



Figura 75 – Protótipo montado.