

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Desenvolvimento de Novas Soluções Materiais
para Cabos de Alta Tensão de Elevado
Rendimento***

Dissertação de Mestrado

de

Eduardo Miguel Correia de Oliveira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

INEGI



Orientador na FEUP: **Doutor Fernão D. Magalhães**

Orientador no INEGI: **Doutor Nuno Pereira Rocha**



Departamento de Engenharia Química

Fevereiro de 2017

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Cabelte S.A pelo projeto POCI-01-0247-FEDER-009974, CATER - Cabos de Alta Tensão de Elevado Rendimento e por LEPABE, pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-006939 (Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, UID/EQU/00511/2013), financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

Ao meu orientador da FEUP, professor Fernão Magalhães, agradeço todo contributo e orientação ao longo da minha dissertação. Agradeço especialmente ao meu orientador do INEGI, Dr. Nuno Rocha, por toda orientação, ajuda, dedicação, paciência e acompanhamento ao longo destes meses e por todo o conhecimento transmitido.

Ao INEGI, pelos recursos que disponibilizou e em especial quero agradecer a todas pessoas da equipa que colaboram neste projeto, em especial à Dr^a Marina Torres e à Eng^a Carla Gomes pelo acompanhamento e ajuda prestados neste período de tempo. Prestar um contributo também ao auxílio de Jhonny Rodrigues e da Jessica Rocha.

À Cabelte, na pessoa da Eng^a Marcela Teixeira, pela disponibilidade prestada e na acessibilidade para que seja possível avançar de forma eficaz neste projeto.

O maior agradecimento, vai para os meus pais, Ascensão e Francisco, por todo o apoio, por todos sacrifícios que fizeram e fazem, para que eu aproveitasse a vida académica ao máximo e conseguisse tirar o maior proveito dos recursos disponíveis.

À minha namorada, Lorena, que foi incansável em estar sempre ao meu lado, em todos os momentos bons e maus e pela paciência demonstrada nestes anos de companheirismo. Agradeço também à sua família, por todo apoio prestado.

Quero agradecer aos meus irmãos, Rui e Paula, por toda ajuda e convivência saudável, como todos irmãos deveriam de ser. Quero agradecer à minha cunhada Susana, e um obrigado especial à minha afilhada Gabriela, por alegrar o ambiente ao seu redor com a sua jovialidade.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos. Em especial aos meus amigos de adolescência Ricardo e Cláudia e aos muitos amigos que me acompanharam neste trajeto académico, como o André, a Ângela, a Sofia e a Patrícia, entre muitos outros.

Resumo

Nos dias de hoje, o consumo de eletricidade é imprescindível para uma família. Com o passar das gerações, cada vez mais, as famílias consomem mais eletricidade, seja porque compraram mais eletrodomésticos, ou os substituíram por eletrodomésticos mais eficazes, mas que consomem mais eletricidade, e por isso, é necessário melhorar e aumentar o transporte de eletricidade pelas zonas rurais, urbanas e até industriais. Por razões ambientais, uma maior proteção a fenómenos naturais e mesmo por razões regulatórias, as empresas de instalação da rede elétrica vêm-se obrigados a enterrar os cabos de alta tensão. Com os cabos de alta tensão enterrados, obriga a que haja um planeamento e uma construção do cabo de forma a que haja uma boa condução de eletricidade e uma boa dissipação de calor.

Com a passagem de eletricidade pelo cabo, é gerado calor, o que provoca um aumento de temperatura nas várias camadas do cabo. A corrente máxima é limitada pela temperatura máxima que a camada de isolamento pode suportar em contínuo. Este estudo visa a implementação de medidas que facilitem a gestão térmica no cabo. A introdução de um *PCM* (*Materiais de Mudança de Fase - Phase Change Materials*) no cabo teria a função de acumular a energia gerada no cabo nas mudanças de estado, entre o estado líquido e sólido, e vice-versa, do *PCM*. Sendo possível assim gerar mais calor, controlando a temperatura a que estaria sujeitas as várias camadas do cabo.

As simulações realizadas tiveram inicialmente em vista identificar qual a melhor localização no cabo para introduzir o *PCM*. As variações de corrente ao longo do dia são muito lentas, assumindo-se que a análise do perfil térmico em estado estacionário permitiria avaliar o efeito da introdução do *PCM*, calculando-se assim a acumulação de calor durante os períodos de operação a intensidades mais altas e a sua devolução ao sistema quando este opera a intensidades mais baixas. Depois, tendo em consideração as localizações onde seria possível inserir o *PCM*, foi estudado o efeito da massa, da temperatura de fusão e do calor latente do *PCM* e a resistência térmica e a temperatura do solo.

Foi estudada a possibilidade do *PCM* ser inserido no condutor, na blindagem ou na bainha, mostrando-se a blindagem a opção mais adequada. Com a inserção do *PCM* na blindagem com uma espessura de 11 mm, uma temperatura de fusão de 64 °C e um calor latente de 250 J/g, obteve-se o maior aumento de corrente relativamente a corrente inicial de 1580 A, sendo esta de 8,86 % resultando numa corrente máxima de 1720 A. Assumindo-se um aumento anual de 2 % ao ano, esta solução permitiria passar o limite de utilização do cabo de 31 para 36 anos. Refletindo-se num ganho do custo de amortização do cabo em 7 818 €/ano.

Palavras Chave (Tema): *PCM*, cabos de muito alta tensão, transferência de calor.

Abstract

Nowadays, the consumption of electricity is imperative for a family. Over the generations, more and more families are consuming more electricity, either because they have bought more appliances, or have replaced them with more efficient appliances, but they consume more electricity, so it is necessary to improve and increase the Rural, urban and even industrial areas. For environmental reasons, greater protection from natural phenomena and even for regulatory reasons, utility installation companies have been forced to bury high voltage cables. With the high voltage cables buried, it requires that there is a planning and construction of the cable so that there is good conduction of electricity and good heat dissipation.

With the passage of electricity through the cable, heat is generated, which causes a rise in temperature in the various layers of the cable. The maximum current is limited by the maximum temperature that the insulation layer can withstand continuously. This study aims to implement measures that facilitate thermal management in the cable. The introduction of a *PCM* into the cable would have the function of accumulating the energy generated in the cable in the state changes, between the liquid and solid state, and vice versa, of the *PCM*. It is thus possible to generate more heat by controlling the temperature at which the various layers of the cable would be subjected.

The simulations were initially designed to identify the best location in the cable to introduce *PCM*. The current variations during the day are very slow, assuming that the steady-state thermal profile analysis would allow to evaluate the effect of the introduction of *PCM*, calculating the accumulation of heat during the operating periods at higher intensities And its return to the system when it operates at lower intensities. Then, considering the locations where *PCM* could be inserted, the effect of the mass, melting temperature and latent heat of the *PCM* and the thermal resistance and soil temperature were studied.

It was studied the possibility of the *PCM* being inserted in the conductor, the shield or the sheath, showing the shielding the most appropriate option. With the insertion of the *PCM* into the shield a thickness of 11 mm, a melting temperature of 64 °C and a latent heat of 250 J/g, The initial current of 1500 A, this being 8,86 % resulting in a maximum current of 1720 A. Assuming an annual increase of 2 % per year, this solution would allow to pass the cable usage limit from 31 to 36 years. Reflecting a gain in the cost of amortization of the cable at 7 818 €/year.

Keywords (Topic): *PCM*, very high voltage cables, heat transfer.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

_____, ____ de fevereiro 2017

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos do Trabalho	2
1.4	Organização da Tese	2
2	Estado da Arte	5
2.1	Cabos de <i>Muita Alta Tensão</i>	5
2.1.1	Aumento do diâmetro do cabo	5
2.2	Sistemas ativos e passivos	6
2.2.1	Preenchimento Térmico	7
2.2.2	Arrefecimento do meio por condutas	8
2.2.3	Arrefecimento dos cabos em túneis	9
2.2.4	Novos conceitos propostos	10
2.3	Material da Mudança de Fase - <i>PCM</i>	12
2.3.1	Identificação de <i>PCM</i>	13
2.3.2	Propriedades dos <i>PCM</i>	14
2.3.3	Aplicações de <i>PCM</i>	16
3	Especificações e Conceitos propostos.....	19
3.1	Estrutura do Cabo Muita Alta Tensão	19
3.2	Seleção do tipo de <i>PCM</i>	21
3.3	Modelo térmico de operação dos cabos Muita Alta Tensão	21
3.3.1	Aplicação da 1ª lei de Fourier	22
3.3.2	Cálculo dos calores gerados em cada camada	22
3.3.3	Modelo Térmico	25
4	Resultados e Discussão	31
4.1	Calculo dos Calores Gerados	31
4.2	Análise de Sensibilidade	31

4.2.1	Efeito da localização do <i>PCM</i>	31
4.2.2	Efeito das temperaturas de fusão e de solidificação do <i>PCM</i>	33
4.2.3	Efeito da massa de <i>PCM</i>	34
4.2.4	Efeito da redução do calor latente do <i>PCM</i>	35
4.2.5	Efeito da corrente máxima permitida.	36
4.2.6	Efeito das propriedades externas ao cabo.....	37
4.3	Simulações com <i>PCM</i> Reais	41
4.4	Análise da durabilidade do cabo	42
4.5	Set-up Experimental	43
5	Conclusões	45
6	Avaliação do trabalho realizado	47
6.1	Objetivos Realizados	47
	Limitações e Trabalho Futuro	47
6.2	Apreciação Final	47
7	Referências	49
	Anexo 1 Lista de <i>PCM</i>	51
	Anexo 2 Cálculo dos calores gerados no cabo	53
1.1	Cálculo do calor gerado no condutor	53
1.2	Cálculo do calor gerado no isolador	54
1.3	Cálculo do calor gerado na blindagem	54
	Anexo 3 Análise de Sensibilidade complementar	55
3.1	Efeito das temperaturas de fusão e de solidificação do <i>PCM</i> :.....	55
3.2	Efeito da massa de <i>PCM</i>	56
3.3	Efeito do calor latente do <i>PCM</i>	57
3.4	Efeito da corrente máxima permitida	58
	Anexo 4 Análise económica	59

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Esquema da alma condutora segmentada.[2]</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 - Esquema de preenchimento térmico.[4]</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3 - Esquema de arrefecimento do meio por condutas.[7]</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4 - Esquema de instalação dos cabos no interior das condutas.[6]</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5 - Foto de túnel utilizado no projeto REE Barajas.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6 - Esquema de cabo com arrefecimento através de materiais criogénicos.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7 - Esquema de um cabo que utiliza o Sistema redox.[7]</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8 - Esquema de cabo com arrefecimento através de ciclo evaporação/condensação.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 9 - Esquema de Sistema de PCM no cabo elétrico.[7]</i>	<i>12</i>
<i>Figura 10 - Variação da temperatura do PCM em função da energia absorvida/dissipada.[8]</i>	<i>13</i>
<i>Figura 11 - Efeito de sub-arrefecimento, com nucleação e sem nucleação.[9]</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12 - Esquema de sistema PCM aplicado a cabos coaxiais. [7].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 13 - Esquema cabo MAT: 1- Alma condutora; 2- semi-condutor interno; 3- isolador; 4- semi-condutor externo; 5- folha metálica; 6- blindagem; 7- folha metálica; 8- borracha; 9- bainha de enchimento; 10- bainha protetora.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 14 - Configuração da instalação de três cabos.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 15 - Diferencial de temperaturas entre o condutor e o meio envolvente.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16 - Diferencial de temperaturas em cada camada do cabo.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17 - Fluxograma para o cálculo do calor que passa pelo PCM, na fase de aquecimento do cabo.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18 - Fluxograma para o cálculo do calor que passa pelo PCM, na fase de aquecimento do cabo.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19 - História de corrente num dia de inverno.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 20 - Perfil de temperaturas ao longo do cabo.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 - História de temperaturas no condutor, na blindagem e na bainha ao longo de 48 horas num cabo sem PCM.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22 - Comparação da história de temperaturas mantendo o diâmetro total igual.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 23 - Efeito da localização do PCM, massa de PCM igual a 620 g, a temperatura de fusão e o calor latente.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 24 - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM na blindagem. A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70 °C.....</i>	<i>34</i>

<i>Figura 25 - Efeito da massa de PCM, na temperatura da interface condutor/isolador, com o PCM na blindagem. Massa de 269 g corresponde a uma espessura de 1 mm; massa de 597 g corresponde a uma espessura de 2 mm e a massa de 1214 g corresponde a 4 mm.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 26 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM na blindagem.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM na blindagem.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28 - Comparação das histórias de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM otimizado para cada uma das localizações inseridas, com a resistência térmica do solo de 0,4 m·K/W.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29 - Comparação das histórias de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM otimizado para cada uma das localizações inseridas, com a temperatura do meio envolvente de 15 °C.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30 - História de temperaturas de diversos PCM na blindagem, com espessura de 4 mm e corrente máxima de 1580 A.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 31 - Intensidade de corrente máxima para cada PCM para atingir a temperatura máxima de operação, com uma espessura de 11 mm de PCM.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 32 - Evolução da corrente ao longo dos anos para o cabo sem PCM e para o cabo com PCM.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 33 - Set-up experimental.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34 - Comparação de temperatura na interface condutor/isolador, entre o cabo sem PCM e com PCM.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 35 - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM no condutor. A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70°C.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 36 - - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM na bainha. A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70 °C.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 37 - Efeito da massa de PCM na interface condutor/isolador, com o PCM no condutor.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 38 - Efeito da massa de PCM na interface condutor/isolador, com o PCM na bainha.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 39 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM no condutor.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 40 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM na bainha.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 41 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM no condutor.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 42 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM na bainha.....</i>	<i>58</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Resumo de instalações reais.</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2 - Dimensão do cabo MAT.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 3 - Calores gerados no cabo para uma corrente de 1500 A.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4 - Parâmetros assumidos para a análise da temperatura de fusão do PCM.</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 5 - Parâmetros assumidos para a análise da massa do PCM.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 6 - Parâmetros assumidos para a análise do calor latente do PCM.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 7 - Parâmetros assumidos para a análise da corrente máxima no PCM.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 8 - Parâmetros assumidos para a análise da resistência térmica do solo.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 9 - Parâmetros assumidos para a análise da temperatura do meio envolvente.</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 10 - Propriedades de PCM.....</i>	<i>41</i>

Notação e Glossário

A	Área	m^2
Ag	Prata	
C	Capacitância	F/m
Co	Cobalto	
Cr	Crômio	
Cu	Cobre	
d	Diâmetro médio da blindagem	m
d_1	Diâmetro interno	m
d_c	Diâmetro da alma condutora	m
d_i	Diâmetro do isolador	m
E_{PCM}	Energia acumulada de PCM	J
f	Frequência	Hz
Fe	Ferro	
I	Corrente	A
k	Condutividade térmica	W/(m·K)
K_p	Coefficiente relacionado com efeito de proximidade	
K_s	Coefficiente relacionado com efeito de peculiar	
K	Resistividade térmica	(m·K)/W
L	comprimento	m
m	Massa de PCM	g/m
Mn	Manganês	
M_w	Peso molecular	g/mol
Q	calor	W/m
r	Raio	m
r_1	Raio interno	m
r_2	Raio externo	m
R	Resistência elétrica	Ω /m
R'	Resistência elétrica à temperatura máxima de operação	Ω /m
R_0	Resistência elétrica à temperatura de 20 °C	Ω /m
s	Distancia entre eixo das almas condutoras	m
T	Resistência térmica	(m·K)/W
T_1	Resistência térmica no isolador	(m·K)/W
T_2	Resistência térmica na blindagem	(m·K)/W
T_3	Resistência térmica na bainha	(m·K)/W
T_4	Resistência térmica no meio envolvente	(m·K)/W
T_{PCM}	Resistência térmica no PCM	(m·K)/W
U_0	Tensão	kV
W_d	Perdas dielétricas	W/m
x	Espessura da camadas	m
X	Reatância	Ω /m
x_p	Fator relacionado com efeito de proximidade	
x_s	Fator relacionado com efeito peculiar	
y_p	Fator do efeito de proximidade	
y_s	Fator do efeito peculiar	

Letras gregas

α_{20}	Coefficiente de temperatura	1/K
ΔH_{PCM}	Calor latente do PCM	J/g
ϵ	Permitividade do isolador	
θ	Temperatura	°C
θ_1	Temperatura interior	°C

θ_2	Temperatura exterior	$^{\circ}\text{C}$
θ_f	Temperatura de fusão	$^{\circ}\text{C}$
θ_s	Temperatura de solidificação	$^{\circ}\text{C}$
λ_1	Rácio entre o calor gerado na blindagem e na alma condutora	
λ'_1	Rácio entre o calor gerado na blindagem a partir das correntes circulantes e na alma condutora	
λ''_1	Rácio entre o calor gerado na blindagem a partir das correntes parasitas e na alma condutora	
λ_2	Rácio entre o calor gerado na bainha e na alma condutora	
Ω	Sistema de frequência angular ($2\pi f$)	

Lista de Siglas

IEC	International Electrotechnical Commission
MAT	Muita Alta Tensão
PCM	Phase Change Material
XLPE	Polietileno Reticulado

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Nos dias de hoje, o consumo de eletricidade é imprescindível para uma família. Seja a iluminar uma divisão da casa, a cozinhar, para lazer ou trabalho, a eletricidade pode ser um ponto comum em todas estas e também em mais atividades domésticas e não domésticas. Com o passar das gerações, cada vez mais, as famílias consomem mais eletricidade, seja porque compraram mais eletrodomésticos, ou os substituíram por eletrodomésticos mais eficazes, mas que consomem mais eletricidade. A nível industrial, também é consumido cada vez mais eletricidade, porque as empresas estão cada vez mais automatizadas, e essa automatização, consumirá mais eletricidade. Em suma, vive-se na era da tecnologia, e com o aperfeiçoamento da mesma, aumenta a dependência da eletricidade.

Nesta perspetiva, é necessário melhorar e aumentar o transporte de eletricidade pelas zonas rurais, urbanas e até industriais. Por razões ambientais, uma maior proteção a fenómenos naturais e mesmo por razões regulatórias, as empresas de instalação da rede elétrica vêm-se obrigados a enterrar os cabos de alta tensão. Com os cabos de alta tensão enterrados, obriga a que haja um planeamento e uma construção do cabo de forma a que haja uma boa condução de eletricidade e uma boa dissipação de calor.

Com a passagem de eletricidade pelo cabo, é gerado calor, o que provoca um aumento de temperatura nas várias camadas do cabo. A corrente máxima é limitada pela temperatura máxima que a camada de isolamento pode suportar em contínuo. Este estudo visa a implementação de medidas que facilitem a gestão térmica no cabo.

Este trabalho foi realizado no âmbito de um projeto do INEGI em parceria com a Cabelte intitulado “Cabos de Alta Tensão de Elevado Rendimento”, onde se pretende testar e inovar a tecnologia existente para melhorar a dissipação de calor e nesse sentido, aumentar a capacidade de eletricidade que o cabo pode garantir. A tecnologia em estudo será a incorporação de um *PCM* numa das camadas do cabo, para ajudar a absorver parte da energia produzida, e com isso, melhorar e até estabilizar a temperatura do cabo ao longo do tempo. Este estudo teve como objetivo as primeiras metas de validação preliminar da tecnologia, caracterização de *PCM* e definição de especificações importantes para a implementação do *PCM* no cabo de muita alta tensão.

1.2 Apresentação da Empresa

O INEGI foi fundado em 1986, e partiu de uma iniciativa conjunta dos departamentos de Engenharia Mecânica e de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. É um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade - Indústria e vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos, o estatuto de «Utilidade Pública» e uma equipa própria de 200 colaboradores, assume-se como um agente ativo no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado no conhecimento, na densidade tecnológica dos produtos e processos e na inovação de base tecnológica.

A Cabelte, S.A., é uma empresa que está presente no mercado das telecomunicações, energia, transportes, edifícios e infraestruturas, na indústria automóvel e na indústria petrolífera. Produz cabos de telecomunicações, energia, para aplicações especiais e cabos de fibra ótica. Este tema insere-se nas suas atividades de desenvolvimento do processo de fabrico de Cabos de Muito Alta Tensão.

1.3 Contributos do Trabalho

Este projeto enquadrou-se na avaliação do estado da arte da tecnologia para aumento de eficiência de cabos de muito alta tensão e avaliar o impacto da introdução da nova solução material proposta. Para esta avaliação preliminar foi necessário determinar o modelo térmico em estado estacionário adequado, para depois confirma-lo a partir das normas internacionais, *IEC 60287*, para conseguir introduzir o efeito que o *PCM* fará quando incorporado no cabo. Foi elaborado um cálculo capaz de simular a história de temperaturas nas várias camadas do cabo, definindo os parâmetros desejados e com isso foi feito um estudo paramétrico para avaliar o efeito das diferentes variáveis de projeto no desempenho do cabo. Este foi, por isso, um contributo muito importante para o projeto preliminar da solução em desenvolvimento.

1.4 Organização da Tese

Este documento está organizado em cinco capítulos principais.

No capítulo de introdução faz-se uma apresentação e um enquadramento do tema abordado. De seguida, é feita a uma apresentação da empresa onde decorreu esta experiência e por fim os contributos pessoais dados ao trabalho realizado.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte. São descritas todas as tecnologias existentes para melhorar a dissipação de calor nos cabos de alta tensão, para serem utilizadas como referência, bem como todas as tecnologias em que é utilizado o *PCM*.

No capítulo três são definidas as especificações para o cabo de alta tensão em desenvolvimento, é feita uma análise aos vários tipos de *PCM* existentes e por fim é estabelecido o modelo térmico proposto para abordar este tema, bem como as condições assumidas.

O capítulo quatro apresenta os vários resultados obtidos através da simulação teórica do modelo definido e discutido todos os resultados obtidos.

Nos dois últimos capítulos são reunidas todas as conclusões que se pode retirar da discussão dos resultados obtidos e elaborada uma apreciação final sobre o trabalho realizado como do trabalho futuro e das limitações encontradas.

2 Estado da Arte

Nos dias de hoje, há uma crescente necessidade de energia elétrica devido aos avanços tecnológicos e à utilização doméstica de muitos utensílios, sendo previsto um aumento de 60% até 2030 no seu consumo. Nesse sentido, há necessidade de transportar cada vez mais corrente elétrica e a solução para esse transporte é a utilização de cabos de muito alta tensão (*MAT*). Devido à exposição aos fenômenos naturais, bem como razões regulatórias, e também porque nos dias de hoje há uma preocupação estética, há uma tendência para a instalação de cabos *MAT* subterraneamente.

Nos cabos *MAT* a eletricidade é transportada através da alma condutora, que é o núcleo do cabo. Pela primeira lei de Joule, a partir da transferência de eletricidade, é gerado calor[1]. Os cabos *MAT* têm como isolante o polietileno reticulado, *XLPE*.

2.1 Cabos de Muita Alta Tensão

Os cabos *MAT*, tipicamente, têm uma área de secção reta do condutor entre os 1000 e os 2500 mm², correspondentes a uma tensão mínima de 220 a 275 kV, havendo casos em que a tensão introduzida nos cabos pode chegar aos 400 kV ou superior.

Estes cabos são compostos por várias camadas. A camada mais interior tem a função de transportar a eletricidade. Uma solução para aumentar a corrente que passa pelo condutor, seria aumentar o diâmetro do condutor, no entanto haveria um aumento da sua temperatura. As camadas seguintes têm a função de isolar termicamente o cabo, de seguida as camadas metálicas protegem da água e isolar qualquer eletricidade que possa passar da camada anterior. Por fim, é revestido por camadas que protegem do meio envolvente.

2.1.1 Aumento do diâmetro do cabo

A solução tradicional para se conseguir o aumento da intensidade de corrente transmitida é minimizar a resistência óhmica do cabo, que tipicamente se realiza pelo aumento do diâmetro do cabo. Esta solução traduz-se diretamente num custo superior, envolvendo maior quantidade de material necessário, maior dificuldade de instalação, comprimento do cabo menor, ou maior número de uniões necessárias.

Com o aumento do diâmetro do condutor, é diminuída a resistência óhmica pelo efeito peculiar, pelo que tipicamente é utilizada uma construção segmentada do condutor. Enquanto na construção segmentada, como está representado na Figura 1, são feitos agrupamentos de fios de cobre que contêm camadas de isolamento, tendo vários agrupamentos com isolamento entrelaçados entre eles; na construção *standard* - o núcleo condutor consiste em fios de cobre que são entrelaçados entre eles (sem qualquer tipo de isolamento).

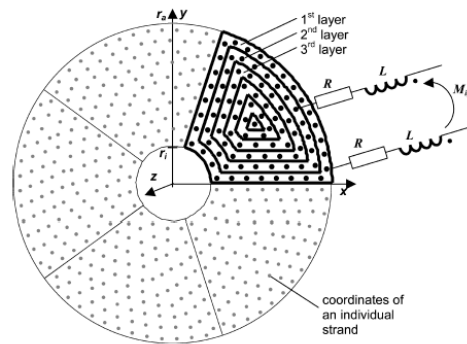


Figura 1 - Esquema da alma condutora segmentada.[2]

Os ganhos de intensidade de corrente entre uma construção *standard* e outra segmentada são comparados num estudo sobre o uso de isoladores na alma condutora dos cabos de alta tensão [3]. Nesse estudo, foram mantidas algumas variáveis como a tensão de 400 kV, o comprimento do cabo de 12 m e o isolamento de XLPE. Foi concluído que com o aumento da secção reta, para ambos os tipos de cabos, a resistência óhmica diminui e o ganho de corrente é superior

A tecnologia de cabos segmentados beneficia quando o custo das matérias primas é alto, tal como no caso do cobre, apresentando um menor custo comparativamente com os condutores *standard* (para uma gama de secções de 1600-2500 mm²).

Em cabos subterrâneos, essa energia é transferida para o solo envolvente ao cabo. Os materiais que compõem o solo, assim como as diferentes camadas dos cabos e a superfície, têm um papel importante na condução do calor produzido e, assim, na eficiência do cabo.

Por este motivo têm vindo a ser estudados vários métodos para otimizar as perdas resultantes do aumento da temperatura no cabo e no solo envolvente ao mesmo.

2.2 Sistemas ativos e passivos

Os sistemas ativos são sistemas que melhoram a dissipação de calor de um cabo por introdução de um fluxo de fluido que promovem a remoção de calor gerado durante o uso do cabo. O arrefecimento do meio pode ser por meio de condutas ou túneis. As condutas são tubos, onde normalmente circula água, que absorvem o calor do meio envolvente arrefecendo-o. Os túneis são corredores amplos, onde é provocada a convecção forçada do ar para melhorar a transferência de calor para o meio envolvente ao cabo.

Para além dos sistemas ativos para melhorar a dissipação de calor, existem os sistemas passivos, que permitem a dissipação de calor através de formas que não englobam circulação de fluidos. Estes sistemas podem consistir desde da substituição do solo envolvente a alteração nas

características do cabo como incorporar um material da mudança de fase (*Phase Change Material - PCM*).

Alternativamente têm sido exploradas alternativas que não impliquem a utilização de sistemas de remoção ativos, tais como a substituição do meio envolvente, através do uso de materiais criogénicos, reações redox, ou ciclos fechados de evaporação/condensação.

2.2.1 Preenchimento Térmico

O preenchimento térmico é um sistema passivo e consiste na substituição do solo envolvente aos cabos de forma a melhorar a condutividade térmica do solo para melhorar a dissipação do calor. Na Figura 2 está representada uma conduta com 3 cabos elétricos e preenchimento térmico (dentro da conduta), com enfoque nas diferentes camadas do solo cuja condutividade térmica é melhorada. A camada envolvente aos cabos *MAT* é designada de *bedding*, e são utilizados materiais com alto teor da humidade, tal como areia húmida, combinações de areia-cascalho e betão-cascalho.

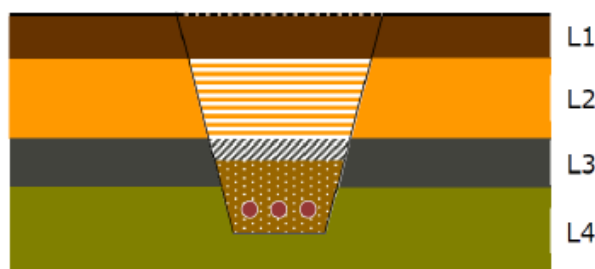


Figura 2 - Esquema de preenchimento térmico.[4]

Outros parâmetros que influenciam a dissipação de calor, para além da condutividade térmica e da humidade do solo, são a largura e a profundidade da trincheira. A partir de um estudo destes parâmetros [5] foi possível analisar que a calor dissipado aumenta com o aumento da largura e com a diminuição da profundidade da trincheira.

Em Copenhaga, foi desenvolvido o projeto NESAs, de implementação real, que foi subdividido em duas secções, através da instalação de cabos de alta tensão na zona norte e outro na zona sul da cidade. Nas duas secções, a tensão dos cabos utilizados foi de 400 kV e com área de secção reta de 1600 mm² Cu e foram enterrados a 1,5 m de profundidade. Nas duas secções, foi utilizado o betão como *bedding*. Na zona norte da cidade, foram instalados 12 km de cabo que consegue transmitir 800 MVA. Na zona sul da cidade, foram instalados 22 km de cabo que consegue transmitir 975 MVA.[6]

Este sistema tem as vantagens da simplicidade da instalação dos cabos, de se poder escolher como *bedding* um material que dê maior proteção física aos cabos, tal como o betão, e,

existindo já uma base de dados de materiais, a empresa optar por outros materiais de *bedding* existentes.

Por outro lado, substituição do extrato de solo, pode criar uma diferença a nível de densidades que poderá levar mais tarde ao surgimento de fendas na superfície.

2.2.2 Arrefecimento do meio por condutas

Para dissipar o calor gerado a partir do transporte de eletricidade e arrefecer o meio envolvente podem ser utilizadas condutas. Nessas condutas circulam normalmente água, mas também pode circular ar ou outro fluido térmico. As condutas podem estar separadas dos cabos ou serem concêntricas aos cabos.

2.2.2.1 Condutas Separadas

Tal como está representado na Figura 3, as condutas circulam nas imediações do cabo. Ocorre o aquecimento da água que é transportada para tanques de armazenamento, à superfície e depois entram novamente em circulação nas condutas.



Figura 3 - Esquema de arrefecimento do meio por condutas.[7]

O estudo apresentado sobre a instalação de condutas separadas dos cabos, [8] identifica que estas instalações podem ter pontos de estrangulamento térmico. Este fenómeno ocorre porque o calor é absorvido nas imediações das condutas e existem pontos no solo em que não ocorrem dissipação do calor absorvido. Nesse sentido, a eliminação desses estrangulamentos térmicos é feita a partir da introdução de outras condutas, mais verticais, de menor diâmetro e que unem as condutas. O aumento da área de contacto do conjunto de condutas com o solo envolvente, permite assim corrigir os estrangulamentos térmicos.

Num projeto implementado na cidade de Viena, numa extensão de 5,2 km, foi utilizado um cabo de 400 kV com uma área de secção reta da alma condutora de 1200 mm² Cu e instalado um sistema de arrefecimento por meio de condutas. Após a instalação, registou-se um ganho de 42% na potência adquirida, atingindo os 1040 MVA.[4]

2.2.2.2 Condutas Integradas

Outra configuração explorada entre as condutas e os cabos *MAT* é a adoção de uma solução integrada onde os cabos se encontram no interior das condutas que por sua vez estão em volta de solo caracterizado, tal como se representa na Figura 4.

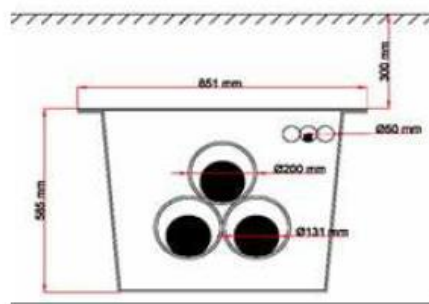


Figura 4 - Esquema de instalação dos cabos no interior das condutas.[6]

Na cidade de Milão foram instalados cabos integrados em condutas numa extensão de 8,4 km e a uma profundidade de 1,7 m. Os cabos têm uma tensão de 400 kV e uma área de secção reta de 2000 mm² Cu com uma capacidade de transmitir eletricidade de 2100 MVA.[6]

Os resultados obtidos nas diferentes instalações mostram que este sistema permite aumentar significativamente a eficácia do transporte de eletricidade.[8]

2.2.3 Arrefecimento dos cabos em túneis

Uma outra estratégia para dissipar o calor gerado pelos cabos de muito alta tensão é a instalação dos cabos em túneis [6]. Nos túneis podem ocorrer convecção forçada do ar para que seja mais eficaz a transferência de calor, tal como mostra a Figura 5.



Figura 5 - Foto de túnel utilizado no projeto REE Barajas.

Existem alguns exemplos de implementação real deste sistema, nomeadamente, o projeto Bewag, em Berlim, o projeto REE Barajas, em Madrid e o projeto NGC em Londres.

No projeto REE Barajas, em Madrid, utilizam-se os túneis para substituir os cabos aéreos existentes perto do aeroporto. Foram construídos circuitos cruzados de túneis, num total de 39 km. Os cabos utilizados tinham uma tensão de 400 kV e uma área de secção reta de 2500 mm² Cu e um comprimento de 850 m. Os túneis têm uma largura de 2 m e uma altura de

2,2 m. A partir desta instalação, a capacidade de transferência de eletricidade foi de 1700 MVA na altura do inverno e no verão há um decréscimo de capacidade até os 1300 MVA.

Estas instalações têm como vantagem o fácil acesso aos cabos facilitando a sua manutenção, no entanto conta com as desvantagens de serem necessários construir os túneis e a manutenção dos sistemas de convecção de ar. Na Tabela 1 está apresentado um resumo das instalações já realizadas e referidas anteriormente.

Tabela 1 - Resumo de instalações reais.

Projeto/Cidade	Tensão	Tipo de Instalação	Comprimento (km)	Área de Secção Reta (mm ² Cu)	Capacidade (MVA)
Milão	400	CC	8,4	2000	2100
Viena	380	CS	5,2	1200	1040
NESA - Copenhaga (Norte)	400	PT	12	1600	800
NESA - Copenhaga (Sul)			22		975
Bewag - Berlim	400	T	6,3	1600	1100
REE Barajas - Madrid	400	T	12,8	2500	1700
NGC Londres	400	T	20	2500	1600

2.2.4 Novos conceitos propostos

Para além destes sistemas que estão mais explorados na literatura e em sistemas reais, existem ainda outras abordagens sugeridas com potencial aplicação a cabos de alta tensão com o intuito de melhorar a sua eficiência.

2.2.4.1 Sistemas de refrigeração com materiais criogénicos

Uma das tecnologias inovadoras sugeridas para otimizar o transporte de eletricidade é o arrefecimento logo à partida dos cabos de muito alta tensão. Para arrefecer os cabos até temperaturas muito baixas, podem utilizar-se como agentes de refrigeração azoto líquido, hélio líquido, ou hidrogénio. Para manter a sua fase líquida, os agentes refrigerantes são adicionados a temperaturas próximas de 92 K (aproximadamente -181 °C), e a pressões elevadas, o que faz com que a resistência óhmica seja praticamente nula. Este sistema apresenta custos de operação, de equipamentos e manutenção muito elevados devido às condições de operação. As estações de refrigeração devem estar pouco distanciadas entre si para se conseguirem manter a temperatura baixa. Na Figura 6 está representado um esquema de cabo arrefecido a partir de materiais criogénicos.[7]

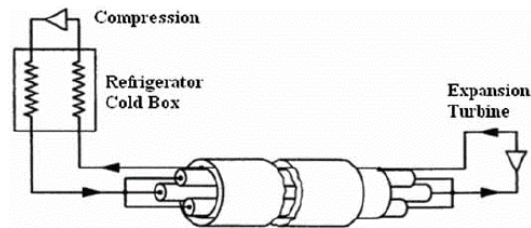


Figura 6 - Esquema de cabo com arrefecimento através de materiais criogênicos.

2.2.4.2 Sistemas Redox

Outro sistema alternativo para diminuir a temperatura dos cabos passa pelo aproveitamento da reação de redução do oxigénio com alguns metais, por esta ser uma reação endotérmica. Os metais utilizados nesta reação redox são Fe, Cr, Co, Cu, Ag ou Mn. Enquanto a corrente elétrica é baixa, a reação de oxidação dá-se na superfície da camada metálica na presença do oxigénio. Posteriormente, com o aumento da corrente, aumenta também a temperatura e dá-se a reação de redução absorvendo a calor gerado. Estes sistemas, apesar de serem simples de instalar, têm uma eficácia limitada para dissipação de calor devido aos poucos ciclos redox previstos. Os materiais são muito pouco flexíveis para poder incorporar o oxigénio em estado gasoso. [7]

Na Figura 7 está representado um esquema do cabo utilizando o sistema redox. Na camada 4 são instalados os metais e na cama 5 é incorporado o oxigénio.

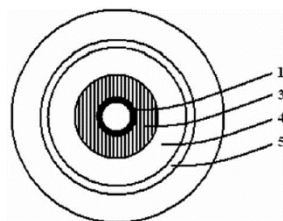


Figura 7 - Esquema de um cabo que utiliza o Sistema redox.[7]

2.2.4.3 Sistema fechado de evaporação/condensação

O sistema de evaporação/condensação tem um potencial interesse para aplicações em cabos MAT uma vez que numa das camadas do cabo é incorporado um fluido volátil que, devido ao aumento da temperatura, pode armazenar o calor dissipado, entrando em evaporação (transição de fase líquido-gás). Quando a temperatura diminui, o fluido volta ao estado líquido através da sua condensação. Os fluidos voláteis explorados neste sistema foram a amónia, o propano e os refrigerantes de fluorcarboneto, tal como clorofluorcarboneto, CFC. A utilização destes fluidos voláteis tem o inconveniente de serem materiais com algum risco ambiental e para a saúde.

Na Figura 8 está representado um esquema de cabo que utiliza o ciclo de evaporação/condensação para arrefecer o cabo.[7]

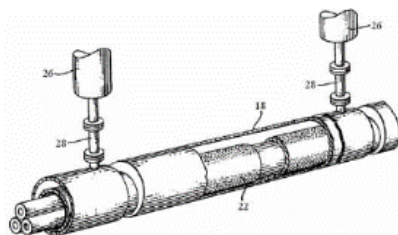


Figura 8 - Esquema de cabo com arrefecimento através de ciclo evaporação/condensação.

2.2.4.4 Sistema com base em PCM

A tecnologia que poderá ser mais eficiente na dissipação do calor gerado é a incorporação de um sistema PCM no cabo MAT. Como o sistema funcionará tirando partido do calor latente entre o estado líquido e sólido, tem uma implementação mais fácil do que o sistema evaporação/condensação. Devido ao seu calor latente também tem mais ciclos de vida relativamente ao sistema redox. [7] Este sistema funcionará como sistema passivo, o que leva a não ser necessário a instalação de tantas estações de monitorização do que os sistemas criogénicos.

Na Figura 9 está representado um esquema de implementação de PCM como bainha exterior do cabo elétrico.

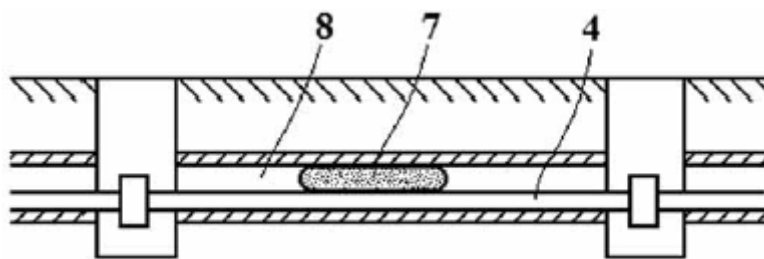


Figura 9 - Esquema de Sistema de PCM no cabo elétrico.[7]

2.3 Material da Mudança de Fase - PCM

A principal característica no PCM é a de possuir um calor de mudança de fase significativamente superior a outros materiais. Na mudança de fase, o material armazena a energia térmica gerada pelo funcionamento do cabo na forma de calor latente. O material, só após estar completamente fundido é que recomeça a subir a temperatura de acordo com a capacidade calorífica da sua forma no esta liquido. Portanto, duas das principais propriedades nos materiais

PCM são a temperatura de fusão e o calor latente, entre outras. Na Figura 10 esta representada a variação de temperatura, perto da temperatura de fusão, com a quantidade de calor armazenado.[9]

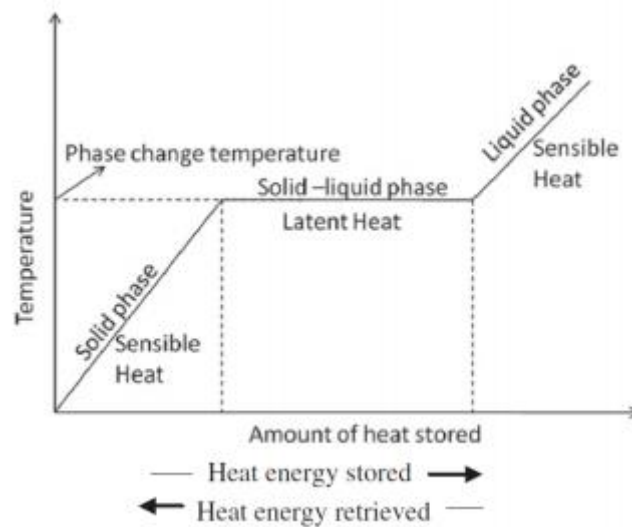


Figura 10 - Variação da temperatura do PCM em função da energia absorvida/dissipada.[8]

2.3.1 Identificação de PCM

Os materiais PCM podem ser divididos em vários grupos de acordo com a sua composição química. A divisão é tipicamente feita em 5 grupos:

- orgânicos - parafinas (ceras),
- orgânicos - não parafinas (álcoois, cetonas, ésteres...),
- inorgânicos,
- hidretos de sais
- eutéticos (orgânicos/orgânicos, inorgânicos/inorgânicos e orgânicos/inorgânicos).

Cada grupo tem características específicas que determinam vantagens e desvantagens para diferentes aplicações, sendo, por isso, necessário conhecê-las em detalhe para que a seleção do material PCM seja o mais adequado.

Os orgânicos, relativamente às ceras, têm uma fusão congruente, boas características de nucleação, não são corrosivos, são económicos e seguros. No entanto, têm uma baixa condutividade térmica, não são compatíveis com contentores plásticos, são moderadamente flameáveis e possuem relativamente grande alteração de volume.

Os materiais orgânicos que não são ceras, como os álcoois, ácidos gordos, entre outros, têm um alto calor de fusão, e são inflamáveis, mas têm baixa condutividade térmica, instáveis a altas temperaturas, são caros e possuem grande variação de volume.

Os inorgânicos, do grupo dos metálicos, têm boa condutividade térmica, têm alto calor de fusão e baixo vapor de pressão, mas, por outro lado, têm o peso relativamente elevado, são corrosivos e são suscetíveis ao super ou sub arrefecimento.

Os hidretos de sais, também têm uma boa condutividade térmica, têm um elevado calor de fusão, uma baixa variação de volume e são baratos, mas pode ocorrer uma separação de fases, a sua fusão é incongruente, têm más propriedades de fusão, são corrosivos e pode ocorrer super ou sub arrefecimento.

Os eutéticos, possuem uma elevada densidade de armazenamento de energia, mas carecem de estudos mais aprofundados das suas características termo-físicas.

2.3.2 Propriedades dos PCM

Para o problema em estudo, é necessário ter em atenção as propriedades físicas, químicas, cinéticas e térmicas dos PCM para prever o comportamento do PCM escolhido no processo de fabrico do cabo MAT, mas também no desempenho final do cabo.

As propriedades físicas a ter em conta são a massa volúmica, a variação de volume entre os estados físicos e a pressão de vapor do PCM. A massa volúmica é uma propriedade relevante porque quanto menos volume ocupar mais PCM pode ser inserido no cabo. Por exemplo, para um mesmo valor de massa, um material com densidade maior, como um metal, ocupará um volume menor do que um material com densidade baixa, como os materiais orgânicos. A utilização de materiais que apresentam calores latentes semelhantes, por unidade de massa, e com densidades superiores podem ter bastante relevância para o sistema, na medida em que permitem reduzir o volume ocupado do cabo.

A maioria dos materiais apresentarão um aumento de volume durante a mudança do estado sólido para o estado líquido. Por exemplo, a parafina no estado sólido, pode ter um aumento de volume de cerca de 5 %, relativamente ao seu estado líquido. Embora este aumento não seja muito significativo é de notar que no contentor de armazenamento do PCM deverá existir um espaço vazio no contentor para acolher esta variação de volume ou compressibilidade suficiente para acomodar este aumento de volume.

Quando o PCM está no estado líquido, este origina uma dada pressão de vapor, sendo esta uma propriedade a considerar para a seleção do material e estrutura do contentor, já que este deverá suportar a pressão gerada pelo PCM no estado líquido.

As propriedades térmicas como o calor latente, a temperatura de fusão, a condutividade térmica e o fenómeno como o sub-arrefecimento são importantes no projeto de um sistema contendo um PCM.

No processo de mudança da fase do *PCM*, distinguem-se dois calores: o calor sensível e o calor latente, como representado na Figura 10. Com o aumento da temperatura até a temperatura de fusão, o material absorve a energia, designado calor sensível, sem haver alteração das propriedades macroscópicas, tal como o volume. Uma vez atingida a temperatura de fusão, a energia absorvida, calor latente, é usada para mudar a fase do estado sólido para o estado líquido, processo durante o qual a temperatura se mantém constante. Uma vez que toda a massa mude para o estado líquido, o calor absorvido é utilizado para aumentar a temperatura do material.

A temperatura de fusão deve ser superior a temperatura do meio envolvente e inferior à temperatura máxima de operação do cabo para que absorva o máximo de energia térmica possível.

A condutividade térmica dos *PCM* é uma propriedade que pode ter um papel muito relevante na eficiência de armazenamento da energia, já que tem um efeito muito significativo no tempo necessário para ocorrer a mudança de fase, revelado pela capacidade dinâmica de absorção/dissipação da energia. Materiais com condutividade térmica baixa, fazem com que a transferência de calor seja lenta, o que influenciará o perfil de temperaturas do sistema. Para aumentar a condutividade térmica dos *PCM* pode ser utilizada a adição das nanopartículas termicamente condutoras ou outro material compatível que seja condutor [9]. Apesar desta solução aumentar a condutividade térmica do *PCM*, também poderá trazer desvantagens, tal como um peso superior e maior custo de instalação.

O sub-arrefecimento traduz-se na diferença entre a temperatura de solidificação e fusão, sendo estas duas das variáveis mais relevantes para a simulação de fenómenos de transferência de calor no projeto. Para diminuir a diferença entre as temperaturas de solidificação e fusão dos *PCM*, tipicamente podem ser adicionados agentes de nucleação, tal como carbono, dióxido de titânio, cobre, alumínio que diminuem o efeito de sub-arrefecimento, como representado na Figura 11 [9].

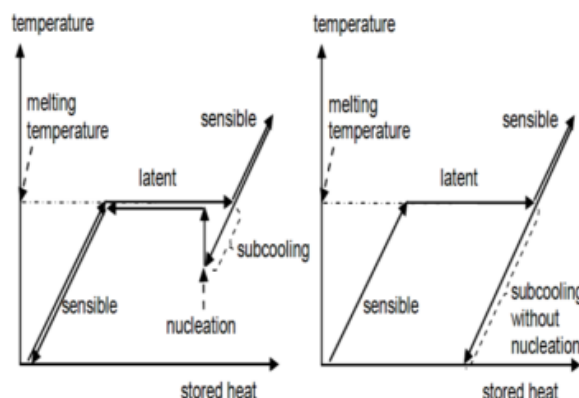


Figura 11 - Efeito de sub-arrefecimento, com nucleação e sem nucleação.[9]

A viscosidade, terá influência tanto no processo de fabrico do cabo como depois ao longo do seu ciclo de vida. A viscosidade é um dos parâmetros mais relevantes a ter em conta, já que esta determina a forma como uma estrutura contendo o *PCM* pode ser fabricada. O peso molecular, M_w , do *PCM* é a propriedade que determina a viscosidade do material. A viscosidade dos *PCM* pode ser cinco mil vezes inferior comparativamente à viscosidade de um polietileno, o que poderá ser prejudicial na linha de montagem do cabo. Uma das estratégias que tem vindo a ser considerada para permitir que o processamento de *PCM* é, de fato, o aumento da viscosidade através da mistura com aditivos.

Juntamente com as propriedades acima enumeradas, a durabilidade, a compatibilidade do *PCM* com a estrutura, a toxicidade e a resistência ao fogo devem ser consideradas neste projeto. A durabilidade dos materiais *PCM* é avaliada pelo teste de ciclo térmico. O material é submetido múltiplas vezes à mudança de fase sólido-liquido. Na avaliação é tido em conta o número de ciclos térmicos sem que haja degradação das propriedades do material.[10] Numa estimativa para a aplicação em cabos *MAT*, assumindo que o *PCM* atingiria a mudança de fase uma vez por dia, significaria que durante 10 anos, o *PCM* estaria sujeito a 3650 ciclos e durante 30 anos estaria sujeito a 10950 ciclos, sendo este normalmente o tempo de vida de um cabo *MAT*.

A compatibilidade do *PCM* com a estrutura envolvente é importante para garantir o desempenho da aplicação e também para evitar a corrosão da estrutura e a contaminação de *PCM* o que poderia reduzir o seu rendimento.

A estabilidade térmica dos *PCM* é tipicamente melhorada com micro ou macro-encapsulamento. Deverá ser notado que o encapsulamento, para além de permitir aumentar o número de ciclos térmicos, também aumenta a área de transferência de calor, permitindo assim aumentar a sua eficiência mássica. [9]

Para a aplicação do *PCM* em cabos *MAT*, este material terá de cumprir as normas de fabrico do cabo, para que, durante o ciclo de vida do cabo, cumpra essas normas respetivamente em relação à toxicidade e à resistência ao fogo, atualmente em vigor.

2.3.3 Aplicações de *PCM*

Atualmente, os *PCM* não são aplicados em cabos *MAT*, mas existem aplicações que utilizam as funcionalidades dos *PCM* para melhorar o seu rendimento. Os *PCM* são utilizados em aplicações diversas. Estes sistemas são aplicados em prédios, incorporado por exemplo em telhas ou no betão para que de forma geral, os edifícios sejam mais frios no verão e mais quentes no inverno. [11] Nos dispositivos de energia solar, em que armazena o calor gerado por radiação durante o dia e o liberta durante a noite. [12]

O sistema *PCM* também é aplicado na conservação de produtos agrícolas, sistemas de refrigeração, incorporação em têxteis, controlo de temperatura de veículos espaciais e arrefecimento de dispositivos eletrónicos, variando o tipo de *PCM* com o intuito e a gama de temperaturas de operação da aplicação. [12] [13] [14] [15].

Foi patenteado também uma aplicação do sistema *PCM* em cabos de aparelhos médicos. O *PCM* neste caso é uma parafina que seria incorporada na parte exterior do cabo que serviria para estabilizar os cabos dos aparelhos médicos, fazendo com que durem mais tempo e aguentem picos de maior utilização, logo, maior desgaste. Na Figura 12 está representado um esquema desta mesma aplicação. [7]

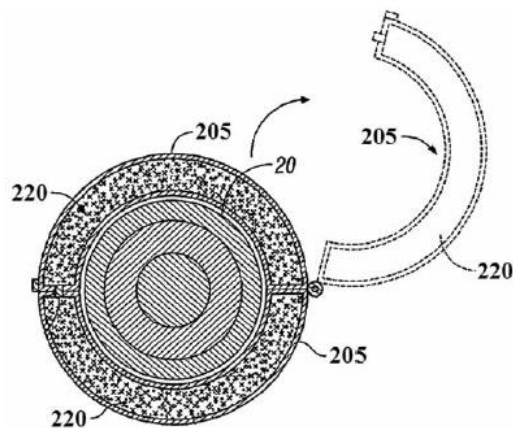


Figura 12 - Esquema de sistema *PCM* aplicado a cabos coaxiais. [7]

3 Especificações e Conceitos propostos

Para aplicar o sistema de *PCM* nos cabos *MAT* é necessário conciliar a estrutura do cabo com as propriedades do *PCM*. Neste trabalho, será estudada a possibilidade do *PCM* ser incorporado no condutor, na blindagem ou na bainha. Na seleção do *PCM* deve ter-se em consideração o material da camada em que possa ser inserido. O *PCM* não deverá reagir quimicamente com o material que forma a camada. A localização do *PCM* poderá ter maior ou menor volume disponível, pelo que a massa volúmica pode ser decisiva na escolha do *PCM* dependendo da localização onde será inserido. A proximidade à fonte de calor leva a uma maior sensibilidade do *PCM* às alterações de temperatura. Estas e outras propriedades serão tidas em conta na seleção do *PCM*.

3.1 Estrutura do Cabo Muita Alta Tensão

O cabo *MAT* é um cabo de múltiplas camadas. Na Figura 13 está representado um esquema das várias camadas do cabo *MAT*.

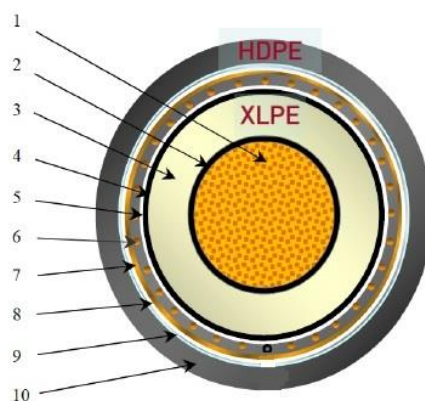


Figura 13 - Esquema cabo MAT: 1- Alma condutora; 2- semi-condutor interno; 3- isolador; 4- semi-condutor externo; 5- folha metálica; 6- blindagem; 7- folha metálica; 8- borracha; 9- bainha de enchimento; 10- bainha protetora.

A camada interior, camada 1, é denominada de alma condutora. A alma condutora é composta por vários fios que podem ser de cobre ou alumínio. Esta camada é onde é introduzida a tensão desejada e onde ocorre o transporte de eletricidade.

As camadas 2, 3 e 4 pertencem à zona de isolamento térmico. São constituídas por compostos dielétricos sólidos, como termoplásticos ou polímeros. A camada 2 é um semi-condutor interno e a camada 4 é um semi-condutor externo que tem como função normalizar o diâmetro do cabo

face às irregularidades do condutor e da interface da blindagem, respetivamente. Têm a função de conferir alguma condutividade elétrica e são constituídas normalmente de polietileno ou borracha. A camada 3 é a camada mais espessa e a que mais contribui para o isolamento térmico. Esta camada é formada por polietileno reticulado (XLPE) que devido à sua alta resistividade térmica é utilizado para isolamento de cabos de média, alta e muito alta tensão. Estas camadas são aplicadas no cabo por tripla extrusão simultânea no cabo.

As camadas 5, 6 e 7 são camadas metálicas. As camadas 5 e 7 são folhas metálicas que conferem uniformização da possível electricidade que atinge a camada por toda a área de contacto. A camada 6 é designada de blindagem que conduz a electricidade que passa pelo isolamento. Estas camadas são feitas de alumínio ou cobre e são aplicadas helicoidalmente. A blindagem está ligada à terra na zona de junção de cabos, conferindo o escoamento de correntes de curto-circuito.

As camadas 8, 9 e 10 são camadas poliméricas ou de borracha, que têm a função de dar resistência física, protegendo o cabo de danos físicos do solo ou impedir a entrada de água no cabo. A camada 8 permite uma homogeneização do diâmetro do cabo. A camada 9 é designada de bainha de enchimento, ou só bainha e a camada 10 é uma fina camada, denominada de bainha de proteção. Na Tabela 2 estão descritas as espessuras, bem como o material em que consiste cada camada do cabo MAT e a sua resistência térmica. O diâmetro apresentado é o diâmetro externo de cada camada.

Tabela 2 - Dimensão do cabo MAT.

Camada	Composição	Resistência Térmica (m·K/W)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
Condutor	Cobre	$2,5 \times 10^{-3}$	-	63,5
Semi-condutor interno	Polietileno	3,5	2,1	67,7
Isolador	Polietileno Reticulado	3,5	22	111,7
Semi-condutor externo	Polietileno	3,5	1,5	114,7
Folha metálica	Cobre	$2,5 \times 10^{-3}$	0,45	115,6
Blindagem	Cobre	$2,5 \times 10^{-3}$	1,89	119,4
Folha metálica	Alumínio	$2,5 \times 10^{-3}$	0,65	120,7
Fita Polimérica	Polietileno	3,5	0,30	121,3
Bainha de enchimento	Polietileno de alta densidade	3,5	4,5	130,3
Bainha Protetora	Polietileno	3,5	0,3	130,9

Neste projeto, foi considerada a configuração de uma instalação de três cabos com o arranjo indicado na Figura 14. Esta é a configuração que permite transportar mais eletricidade para os centros de distribuição e foi considerado também todos os efeitos eletromagnéticos que têm uns em relação aos outros.

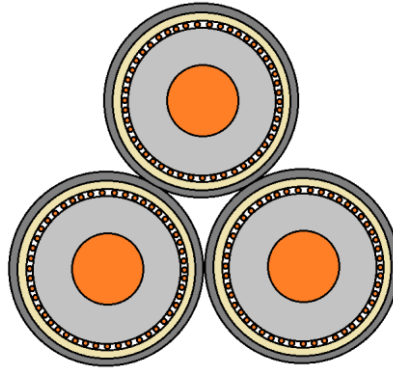


Figura 14 - Configuração da instalação de três cabos.

3.2 Seleção do tipo de PCM

Para escolher o melhor PCM para o projeto em causa será necessário avaliar as propriedades já descritas para selecionar a melhor solução nos vários tipos de PCM existentes. No Anexo 1 está uma lista de alguns PCM e as suas propriedades.

Os PCM metálicos são os que têm melhores condutividades térmicas, no entanto, por estes terem temperaturas de fusão superiores à temperatura máxima de operação do cabo, deixam de ser opção. Os que têm temperaturas de fusão na gama desejada, são mais caros e devido à sua massa volúmica elevada pode aumentar o peso do cabo o que aumentará também a pressão sobre as camadas internas ao PCM.

Os hidretos de sais e os eutéticos inorgânicos/inorgânicos têm temperaturas de fusão dentro dos parâmetros estabelecidos, no entanto, como na mudança de fase ocorre uma separação de fase, requerem agitação o que não é possível no projeto em questão.

Os PCM orgânicos, como as parafinas ou os ácidos gordos, têm uma temperatura de fusão dentro da gama de temperaturas pré-definidas e têm também capacidade de armazenar muita energia, e relativamente às características já enumeradas, torna-os ideais para o projeto.

3.3 Modelo térmico de operação dos cabos Muita Alta Tensão

Para prever o perfil de temperaturas ao longo das várias camadas do cabo, é necessário recorrer a um modelo térmico.

3.3.1 Aplicação da 1ª lei de Fourier

O modelo térmico descrito, baseia-se na 1ª lei de Fourier (1), já que se assume que as variações de corrente são suficientemente lentas para que o comportamento se possa prever com base em estados estacionários múltiplos.

$$Q = kA \frac{d\theta}{dr} \quad (1)$$

De acordo com a equação 1, Q é a quantidade de calor que atravessa a área A , k , é a condutividade do material, e $\frac{d\theta}{dr}$, a derivada da temperatura em relação à posição radial. Integrando a equação (1) entre um r_1 a uma temperatura θ_1 e r_2 a uma temperatura θ_2 e em que $A = 2\pi r L$, em que r é o raio da cabo e L , o comprimento do cabo:

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi L k \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \Leftrightarrow Q \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 2\pi L k \times (\theta_2 - \theta_1) \quad (2)$$

Considerando a resistência térmica, K , como o inverso da condutividade e $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

$$\Delta\theta = Q \frac{K}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3)$$

Subtraindo e somando r_1 no numerador e denominador do logaritmo e depois definindo que $d_1 = 2 \times r_1$:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= Q \frac{K}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{r_2 + r_1 - r_1}{r_1 + r_1 - r_1}\right) \Leftrightarrow \Delta\theta = Q \frac{K}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{r_2 - r_1}{2 \times r_1 - r_1} + \frac{r_1}{2 \times r_1 - r_1}\right) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \Delta\theta = Q \frac{K}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{2x}{d_1} + 1\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Em que x é a espessura da camada.

Define-se a resistividade térmica, T , como vem na equação 5.

$$T = \frac{K}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{2x}{d_1} + 1\right) \quad (5)$$

Em suma, a temperatura entre n camadas em série traduz-se na equação 6, em que i indica cada camada.

$$\Delta\theta = \sum_{i=1}^n (Q_i \times T_i) \quad (6)$$

3.3.2 Cálculo dos calores gerados em cada camada

Como referido na equação 6, é possível definir o diferencial de temperaturas entre a alma condutora e o meio envolvente, calculando o somatório dos calores gerados vezes as resistências térmicas de cada camada. Na Figura 15, é ilustrado um esquema representativo do diferencial de temperaturas entre o condutor e o meio envolvente.

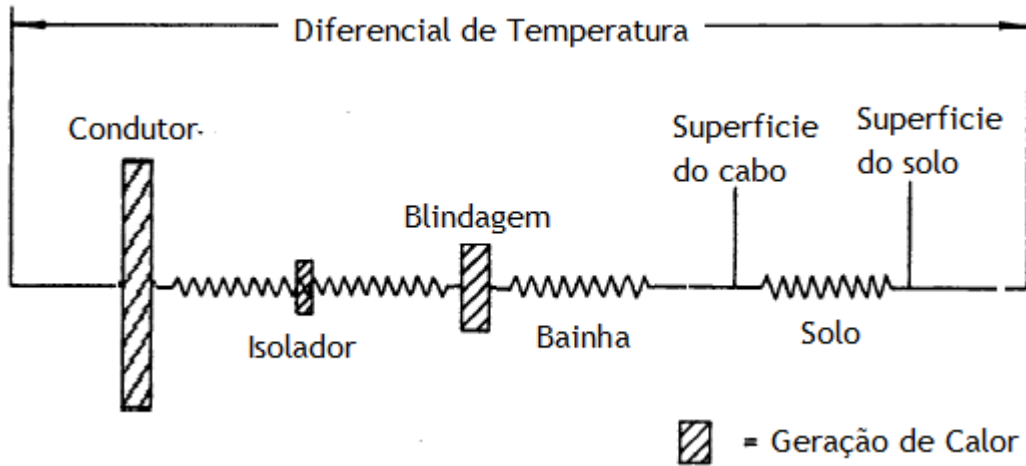


Figura 15 - Diferencial de temperaturas entre o condutor e o meio envolvente.

Por isso, é necessário determinar os calores gerados nas várias camadas do cabo.

3.3.2.1 Calor gerado no condutor

Devido ao transporte de corrente elétrica, é gerado calor nos cabos MAT. A principal fonte é o condutor. A partir da 1ª Lei de Joule que pode-se calcular o calor gerado[16]:

$$Q = I^2 R \quad (7)$$

Em que I , é a corrente gerada e R a resistência elétrica no condutor.

A resistência elétrica é definida a partir da resistividade elétrica do condutor, do efeito de proximidade, y_p de cabos e do efeito peculiar, y_s , como definido pela equação 8[16].

$$R = R'(1 + y_p + y_s) \quad (8)$$

R' é a resistência elétrica do condutor à temperatura máxima de operação e definida pela equação 9.[16]

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (9)$$

R_0 é a resistência elétrica à temperatura de 20 °C, α_{20} é o coeficiente de temperatura e θ é a temperatura máxima de operação.

O efeito de proximidade o desequilíbrio na distribuição da densidade de corrente, originado pelo fenómeno de indução entre vários condutores próximos.[16]

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (10)$$

O diâmetro do condutor é d_c , s é a distância entre as almas condutores dos cabos e x_p é uma relação entre a frequência induzida e uma constante relacionada com o material do condutor e como é processado do condutor, k_p , como representa a equação 11.[16]

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_l} \cdot 10^{-7} k_p \quad (11)$$

O efeito peculiar já explicado no capítulo anterior, é definido, de forma análoga como o efeito de proximidade pela equação 12.[16]

$$y_s = \frac{x_s^4}{192+0,8x_s^4} \quad (12)$$

x_s pode ser definido pela frequência induzida no cabo, a resistência elétrica do condutor e uma constante relacionada com o material do conduto e como foi processado o mesmo.[16]

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_l} \cdot 10^{-7} k_s \quad (13)$$

No Anexo 2, está apresentado o exemplo de cálculo.

3.3.2.2 Calor gerado no isolador

É certo que o isolador tem a função de impedir a passagem de calor gerado pelo condutor, no entanto, existem sempre perdas de corrente elétrica para fora do condutor. Devido a essas perdas, e por consequência da passagem de corrente elétrica pelo isolador, é gerada também uma pequena quantidade de calor nesta camada. Este calor é definido por W_d , e é uma relação entre a tensão introduzida no cabo, U_0 , a capacitância do condutor, C , e um fator de perdas dielétricas, $\text{tg } \delta$, tal como representado na equação 14.[16]

$$W_d = \omega \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \text{tg } \delta \quad (14)$$

O ω é a frequência de onda em hertz e é dada pela seguinte expressão $\omega = 2\pi f$. A capacitância é uma relação da permitividade do isolador, ϵ , e os diâmetros do isolador, d_i , e do condutor, d_c . [16]

$$C = \frac{\epsilon}{18 \times \ln\left(\frac{d_i}{d_c}\right)} \cdot 10^{-9} \quad (15)$$

No Anexo 2, está apresentado o exemplo de cálculo.

3.3.2.3 Calor gerado na blindagem

A blindagem é a camada cuja função é escoar a eletricidade que passa pelo isolador e ao mesmo tempo fazer a ligação do cabo à terra no momento da união entre cabos. Devido à passagem de corrente, também na blindagem é gerado calor. O calor gerado na blindagem é uma fração do calor gerado no condutor, que é tipicamente definido para cada tipo de cabo [16]. Multiplicando o calor gerado no condutor, calculado pela equação 7, pelo fator de perdas de calor na blindagem, λ_1 : [16]

$$Q = I^2 R \cdot \lambda_1 \quad (16)$$

O fator de perdas de calor na blindagem pode ser separado em correntes elétricas que circularão na blindagem, designadas, correntes circulantes, λ'_1 , e correntes parasitas, λ''_1 , podendo então calcular o fator de perdas a partir da equação 17.[16]

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (17)$$

As correntes circulantes podem ser calculadas a partir da equação 4.1.1, relacionando a resistência elétrica no condutor, a resistência elétrica na blindagem, R_2 , e o fator X que é a relação entre a distancia entre as almas condutoras dos diferentes cabos da instalação e o diâmetro médio da blindagem, d . As correntes circulantes são calculadas a partir das equações 18 e 19.[16]

$$\lambda'_1 = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{X}\right)^2} \quad (18)$$

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (19)$$

Neste projeto, as correntes parasitas podem ser desprezadas, de acordo com a norma IEC 60287-1-1. Este parâmetro só é contabilizado para maior diâmetros de condutor.[17]

Noutras configurações, poderia ser possível haver geração de calor na bainha, se esta fosse de metal. Caso existisse geração de calor na bainha, o fator de perdas de calor na bainha seria dado por $I^2R \cdot \lambda_2$. Neste projeto, λ_2 sé considerado nulo, já que o cabo em estudo tem uma bainha polimérica.

No Anexo 2, está apresentado o exemplo de cálculo.

3.3.3 Modelo Térmico

Após determinar os vários calores gerados e associá-los às respectivas resistências térmicas, foi deduzida a equação 5[16], que segundo a norma IEC 60287-1-1 é o modelo a utilizar para calcular o diferencial de temperaturas entre a alma condutora e o meio envolvente.

$$\Delta\theta = \left(I^2R + \frac{1}{2}W_d\right) \cdot T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d] \cdot n \cdot T_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \cdot n \cdot (T_3 + T_4) \quad (20)$$

De acordo com a equação 20, T_1 , T_2 , T_3 e T_4 são as resistências térmicas do isolador, da blindagem, da bainha e do meio envolvente, respetivamente e n é o número de cabos que estarão a ser considerados na instalação. Esta equação permite determinar também os calores gerados em cada camada e assim perceber o efeito da introdução do PCM. Na Figura 16 é representado o diferencial de temperaturas em cada, tendo em consideração a equação 20.

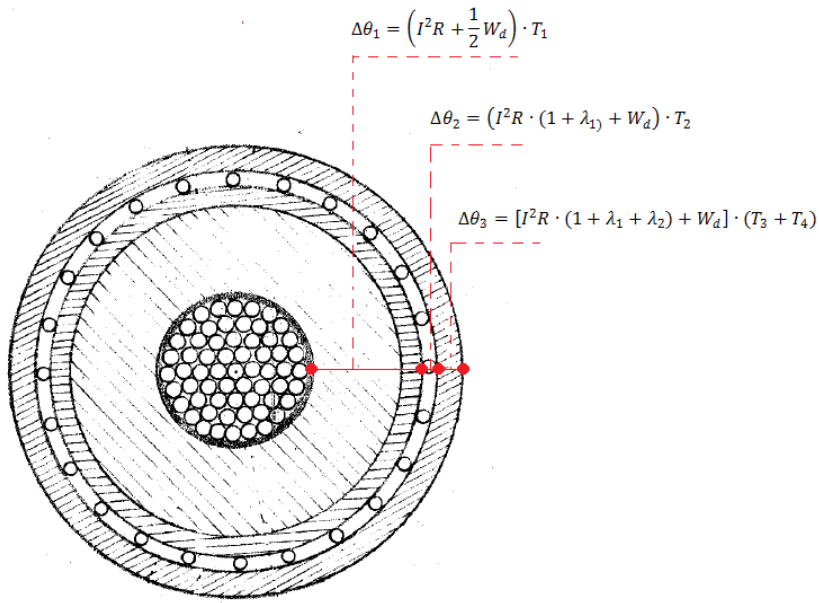


Figura 16 - Diferencial de temperaturas em cada camada do cabo.

3.3.3.1 Modelo Térmico com o PCM

O PCM será introduzido no modelo térmico numa das parcelas da equação 20, dependendo da localização onde será inserido no cabo. Como explicado anteriormente, quando a temperatura do PCM é inferior à temperatura de fusão, o calor que passa pela camada de PCM rege-se de forma análoga à equação 20, acrescentando a resistência térmica do PCM, T_{PCM} . Quando a temperatura do PCM é igual à sua temperatura de fusão, θ_f , o PCM começa a acumular energia, E_{PCM} . A energia que o PCM acumula ao longo do tempo, é expressa pela diferença de calor que chega ao PCM, Q_{in} , menos o calor que sai do PCM, Q_{out} , num tempo t_{PCM} , que é o tempo que o PCM demorará a saturar, como é descrito nas equações 21, 22.

$$E_{PCM} = \int_{t_{i,fusão}}^{t_{f,fusão}} (Q_{in} - Q_{out}) dt \quad (21)$$

$$t_{PCM} = t_{f,fusão} - t_{i,fusão} \quad (22)$$

Ao combinar as equações 21 e 22, dá origem à equação 23.

$$E_{PCM} = \sum_{i=1}^{t_{PCM}} (Q_{in} - Q_{out}) \Delta t \quad (23)$$

Quando o PCM está a funcionar, a temperatura do PCM não é alterada e assim, o calor gerado da camada de PCM para o ambiente permanece inalterado durante a fusão do PCM porque a temperatura do meio envolvente também está a ser considerada constante. O PCM deixará de acumular energia quando saturar, ou seja, quando a quantidade total de energia acumulada igualar o seu calor latente. Com a saturação do PCM, a temperatura do PCM continuará a

aumentar, se for mantida a corrente ou até aumentada. A partir do momento em que ocorre uma diminuição de corrente, ocorrerá novamente uma diminuição de temperatura das camadas entre o condutor e o PCM. Quando a temperatura do PCM atingir a temperatura de solidificação, θ_s , a temperatura permanecerá constante até que o PCM liberte todo calor armazenado até então.

Caso o PCM seja inserido na blindagem (nos espaços vazios disponíveis), ou logo após a blindagem, calor que passa pela blindagem do PCM, enquanto a temperatura do PCM aumenta é dado pela seguinte equação:

$$Q_2 = \begin{cases} [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] \theta \neq \theta_f \\ \frac{\Delta\theta_{3-4}}{T_3 + T_4}, \theta = \theta_f \wedge E_{PCM} < \Delta H_{PCM} \cdot m \end{cases} \quad (24)$$

Q_2 é o calor que entra no PCM, ΔH_{PCM} é o calor latente do PCM e m é a massa de PCM.

Quando a temperatura do PCM diminui, o calor que atravessa o PCM é dado pela equação 25.

$$Q_2 = \begin{cases} [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] \theta \neq \theta_s \\ \frac{\Delta\theta_{3-4}}{T_3 + T_4}, \theta = \theta_s \wedge E_{PCM} < \Delta H_{PCM} \cdot m \end{cases} \quad (25)$$

Na Figura 17 está representado o fluxograma no processo de aquecimento do cabo, complementando a informação da equação 24.

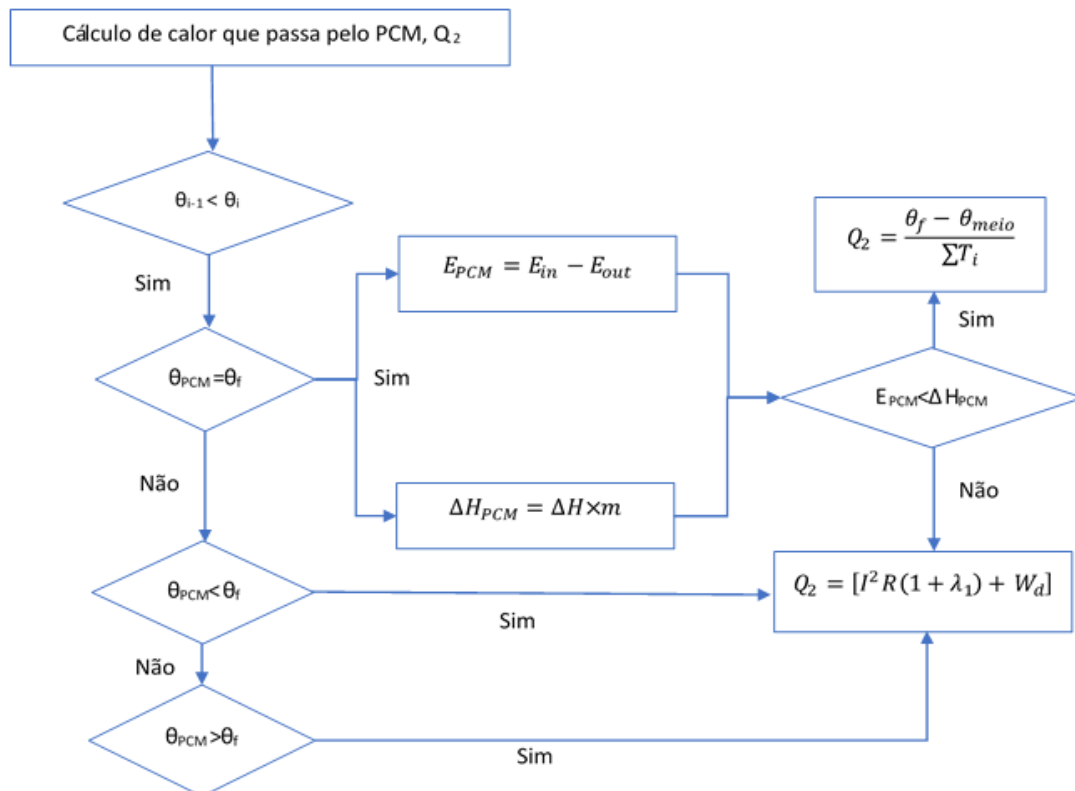


Figura 17 - Fluxograma para o cálculo do calor que passa pelo PCM, na fase de aquecimento do cabo.

De forma análoga, na Figura 18, está representado o no processo de arrefecimento do cabo, complementando a informação da equação 25.

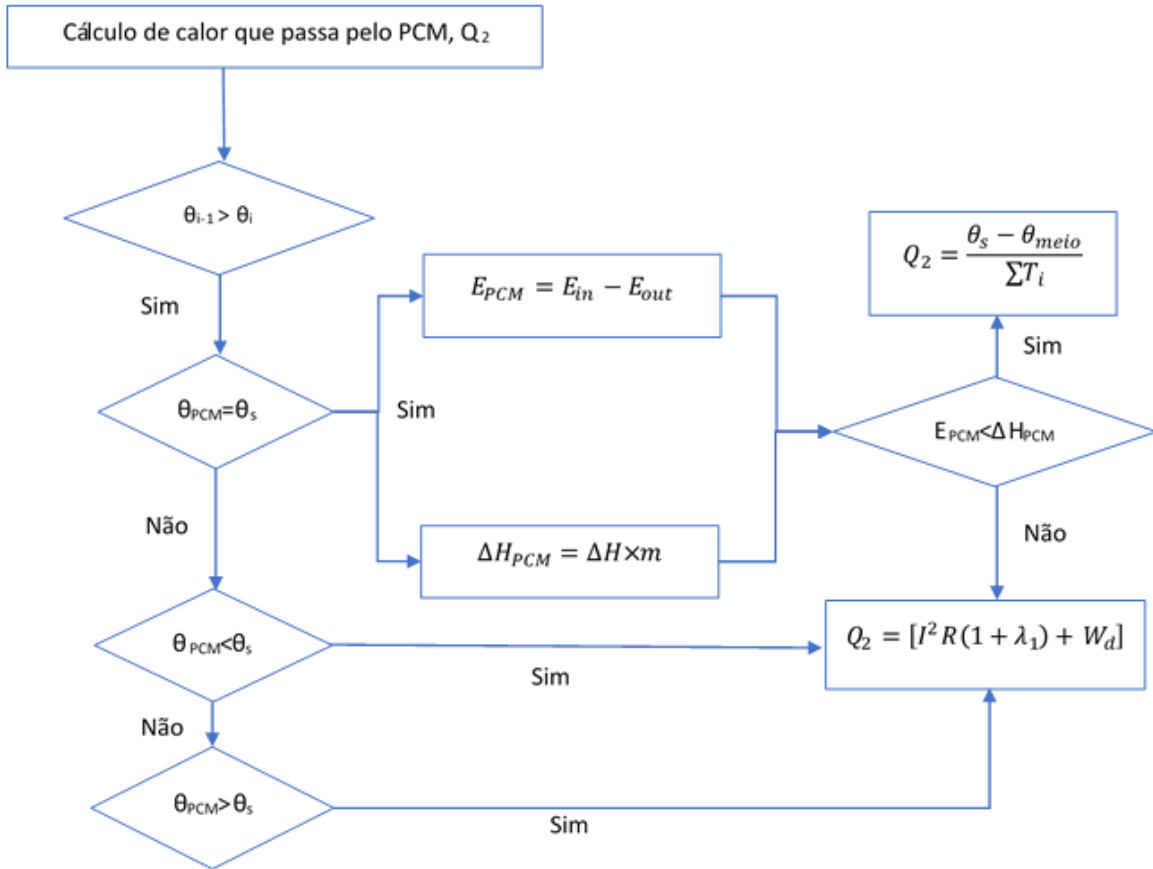


Figura 18 - Fluxograma para o cálculo do calor que passa pelo PCM, na fase de aquecimento do cabo.

Para efeitos de simulação, foi considerado a média horária da corrente utilizada ao longo de um dia de inverno[18]. A história de corrente está representada na Figura 19.

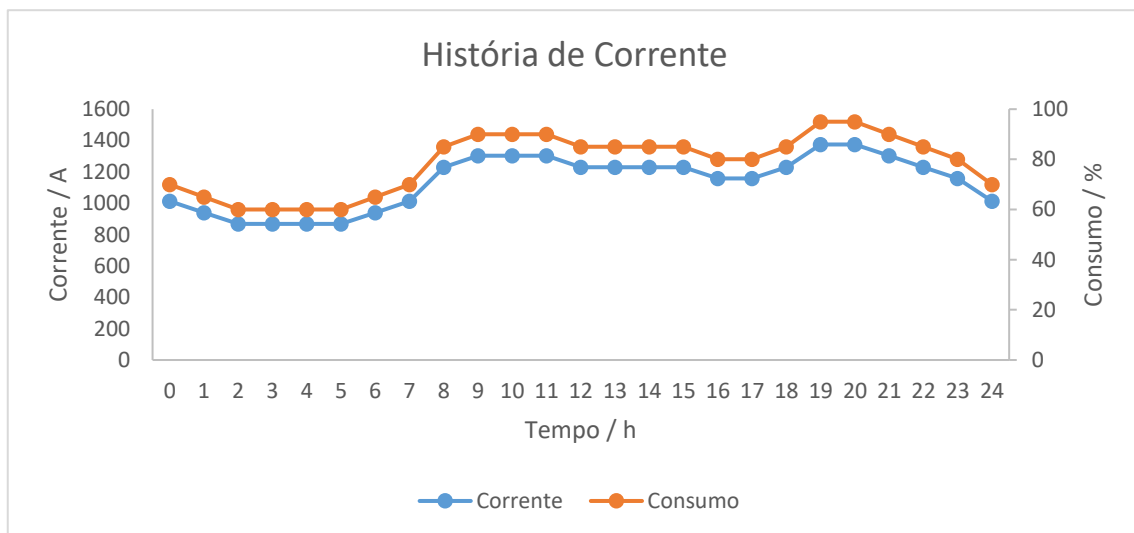


Figura 19 - História de corrente num dia de inverno.

A corrente máxima que foi utilizada como referência foi de 1500 A porque a essa intensidade de corrente, a temperatura que atinge a interface condutor/isolador é de 89 °C, que é próxima da temperatura máxima de operação, de 90 °C. A Figura 20 representa o perfil de temperaturas ao longo das camadas do cabo para a corrente máxima estabelecida.

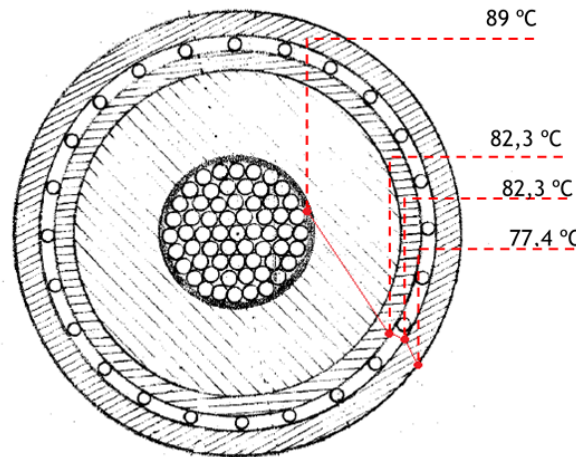


Figura 20 - Perfil de temperaturas ao longo do cabo.

Para a análise paramétrica, as propriedades do *PCM* assumidas foram as propriedades médias de uma parafina, considerando-se um calor latente de 200 J/g, a temperatura de fusão e de solidificação de 60 °C, e a resistência térmica é do *PCM* é 4,76 m·K/W. Será tido em consideração que o aumento do diâmetro total do cabo, com *PCM*, não deverá exceder em 3 % o diâmetro total do cabo sem *PCM*.

4 Resultados e Discussão

4.1 Cálculo dos Calores Gerados

Na Tabela 3 estão calculados os calores gerados pela passagem de eletricidade no condutor, no isolador e na blindagem.

Tabela 3 - Calores gerados no cabo para uma corrente de 1500 A.

Camada	Calor (W/m)
Condutor	21,5
Isolador	1,43
Blindagem	15,5

A resistência elétrica do cobre, R , é de $9,5 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ e o rácio entre o calor gerado na blindagem e na alma condutora, λ_1 , é de 0,72 de acordo com equação 17 [16].

4.2 Análise de Sensibilidade

A partir das especificações enumeradas no capítulo 3, foi determinada a história de temperaturas ao longo de 48 horas para um cabo convencional, representada na Figura 21.

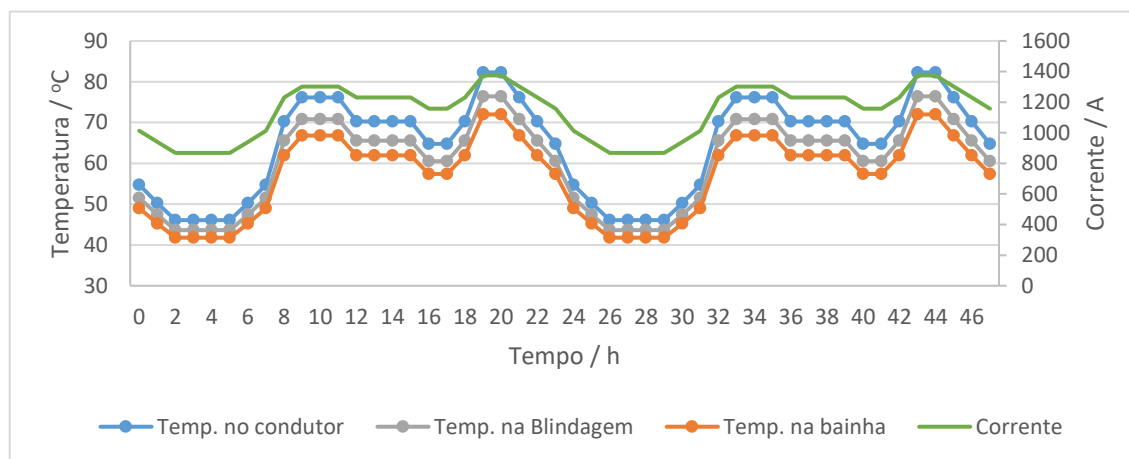


Figura 21 - História de temperaturas no condutor, na blindagem e na bainha ao longo de 48 horas num cabo sem PCM.

4.2.1 Efeito da localização do PCM

Com a incorporação do PCM no cabo, haverá um aumento no diâmetro total do cabo. Foi assumido, com referido no capítulo anterior, um aumento do diâmetro total de 3. Na Figura 22

está representada a história de temperaturas no condutor, comparando as três localizações onde poderá ser introduzido o *PCM*.

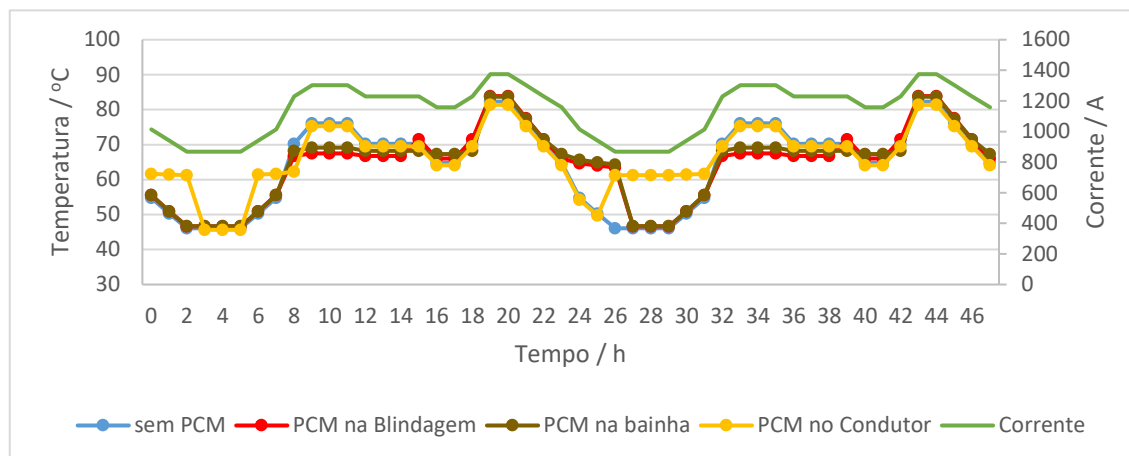


Figura 22 - Comparação da história de temperaturas mantendo o diâmetro total igual.

Tendo em conta as restrições de diâmetro total do cabo, a espessura da camada de *PCM* nos três cenários é igual a 2 mm. Por isso, como a colocação do *PCM* nas diferentes camadas é feita a diâmetros diferentes, a massa de *PCM* disponível em cada configuração varia. Assim, a massa de *PCM* no condutor, na blindagem e na bainha é de 319 g/m, 597 g/m e 620 g/m, respetivamente. Nesta simulação, a localização do *PCM* vai influenciar a resistência térmica do mesmo, T_{PCM} , que no condutor é maior, e vai decrescendo à medida que se afasta do centro do cabo. O *PCM* no condutor terá então a resistência térmica aumentada, e, logo à partida, a temperatura no condutor é maior, o que faz com que o *PCM* comece a simulação ativo. Neste local, devido à menor quantidade de massa, o *PCM* satura e liberta calor mais rapidamente. O *PCM* na blindagem e na bainha têm aproximadamente o mesmo comportamento, ele fica ativo a maior parte do tempo da simulação, no entanto, nos picos de maior intensidade de corrente, o *PCM* já se encontra saturado.

No caso em que a massa de *PCM* seja igual, e correspondente à massa disponível com um aumento de 3 % do diâmetro do cabo, com o *PCM* na bainha, de 620 g/m, sendo a variável em estudo a localização de *PCM* no cabo, obtém-se as histórias de temperatura representadas na Figura 23.

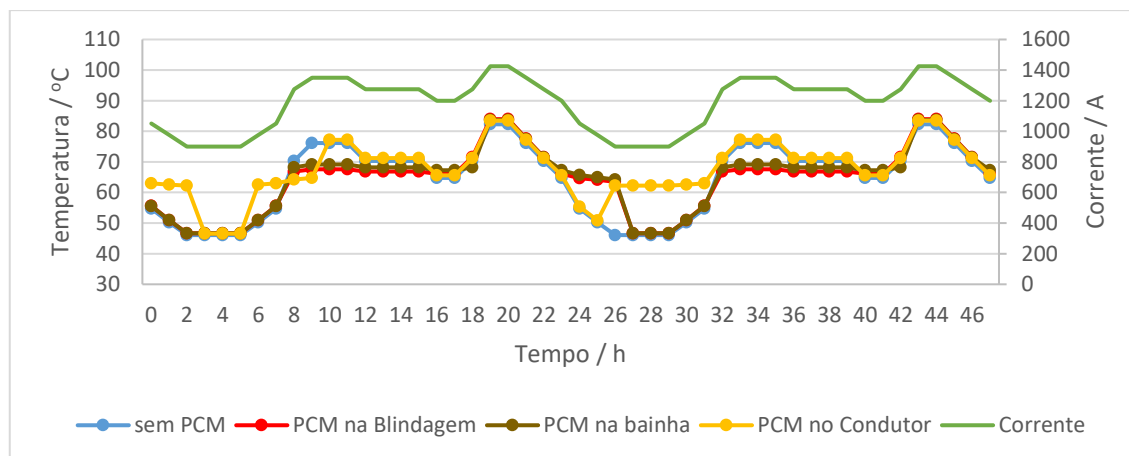


Figura 23 - Efeito da localização do PCM, massa de PCM igual a 620 g/m, a temperatura de fusão e o calor latente.

Com a massa de *PCM* igual, a capacidade de acumular energia é igual em todos os cenários, variando apenas a energia chega ao *PCM*. Onde passa mais energia é junto do condutor, e o aumento de massa de *PCM* no condutor não foi o suficiente para ocorrer melhorias significativas relativamente ao estudo anterior. Comparativamente com o estudo anterior, com o aumento da massa de *PCM* na blindagem, melhorou a sua história de temperaturas, aproximando-a da história de temperaturas com o *PCM* na bainha, mas com temperaturas sempre inferiores. No entanto, continuam a atingir os picos de maior intensidade de corrente com o *PCM* saturado. Nas secções seguintes serão analisados os vários parâmetros com o *PCM* na blindagem, visto ser este cenário o mais eficaz.

4.2.2 Efeito das temperaturas de fusão e de solidificação do *PCM*.

As temperaturas de fusão e solidificação são importantes analisar porque definem as temperaturas em que o *PCM* começa a ficar ativo. Para efeito de simplificação, assumiu-se que as temperaturas de fusão e de solidificação serão as mesmas. Na Figura 24, está representada a história da temperatura na interface condutor/isolador na blindagem. Na Tabela 4 estão descritas as condições das simulações.

Tabela 4 - Parâmetros assumidos para a análise da temperatura de fusão do *PCM*.

Corrente máxima (A)	1500
Calor latente (J/g)	200
Massa de <i>PCM</i> (g)	Equivalente a uma espessura de 2 mm no cabo
Temperatura de fusão	Variável

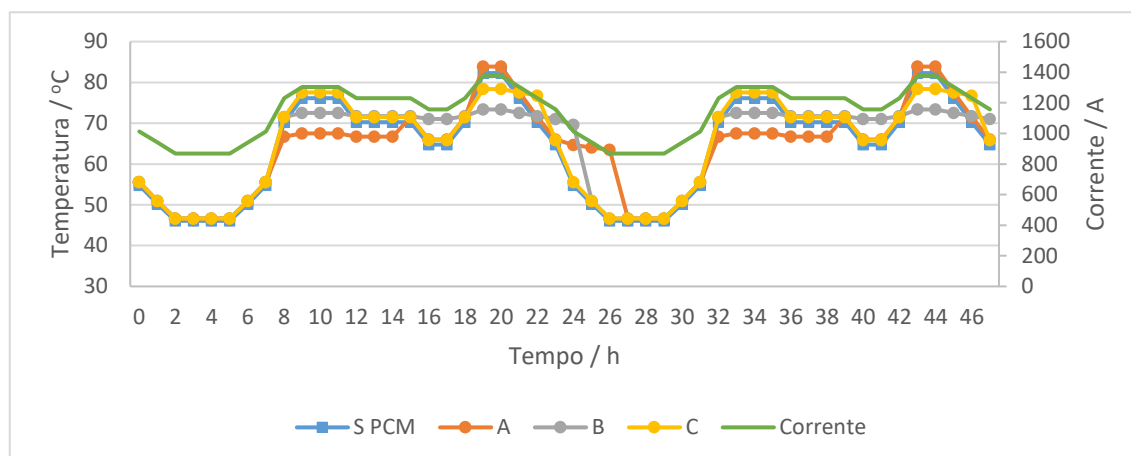


Figura 24 - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM na blindagem.

A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70 °C.

Com o *PCM* na blindagem, é possível observar que a baixas intensidades de corrente, os *PCM* com menores temperaturas de fusão fazem com que a temperatura na interface em estudo estabilize por mais tempo. No entanto, nos picos de corrente, o *PCM* já se encontra saturado e não diminui a temperatura na interface. Com o *PCM* com uma temperatura de 70 °C faz com que ele fique ativo nas horas anteriores em que a intensidade de corrente baixa, libertando a energia acumulada antes da diminuição de corrente. Nesta situação o *PCM* não chega a saturar antes de começar a devolver o calor ao sistema (altura em que a intensidade de corrente diminui). Com este efeito, existe um maior diferencial de temperatura e a temperatura máxima não é a ideal. No *PCM* com uma temperatura de fusão de 65 °C ocorre uma maior estabilização de temperaturas e a temperatura máxima é a mais baixa das três em estudo, o que leva a concluir que será esta temperatura mais adequada para esta localização. No Anexo 3, está representado o efeito da temperatura de fusão do *PCM*, na interface condutor/isolador, com o *PCM* inserido no condutor e na bainha respetivamente.

4.2.3 Efeito da massa de *PCM*.

A quantidade de *PCM* inserido no cabo é importante porque é diretamente proporcional à quantidade de energia que o *PCM* pode acumular. Na Figura 25 está representada a história de temperatura na blindagem, variando-se a massa de *PCM*, em função de diferentes espessuras alvo. Na Tabela 5 estão descritos os parâmetros tidos em conta para esta simulação.

Tabela 5 - Parâmetros assumidos para a análise da massa do PCM.

Corrente máxima (A)	1500
Calor latente (J/g)	200
Temperatura de fusão do PCM na blindagem (°C)	65
Massa de PCM	Variável

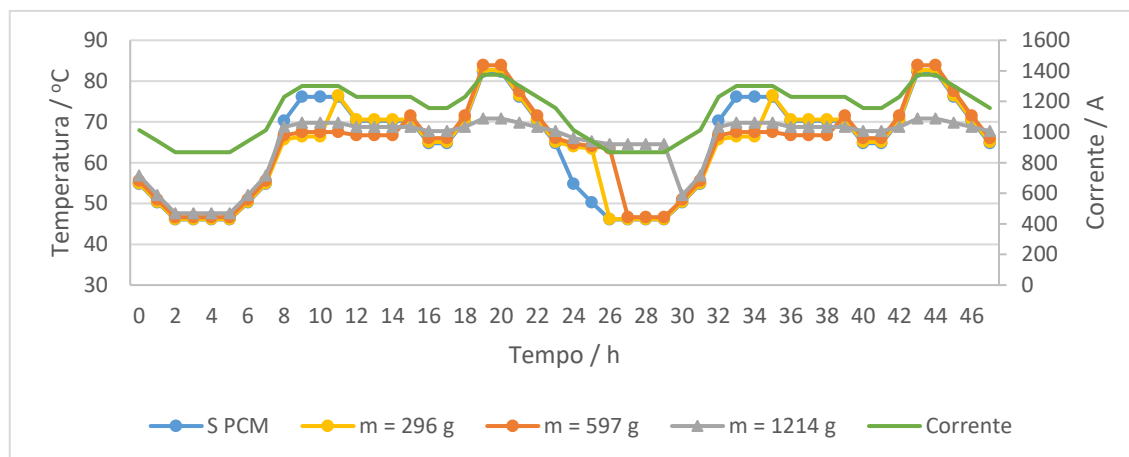


Figura 25 - Efeito da massa de PCM, na temperatura da interface condutor/isolador, com o PCM na blindagem. Massa de 269 g/m corresponde a uma espessura de 1 mm; massa de 597 g/m corresponde a uma espessura de 2 mm e a massa de 1214 g/m corresponde a 4 mm.

Com o PCM na blindagem, as massas de 296 g/m, 597 g/m e 1214 g/m, em estudo, foram calculadas a partir das espessuras de espaço disponível sendo elas 1 mm, 2 mm e 4 mm respetivamente. Neste cenário, é possível observar uma maior estabilização da temperatura, com o aumento da massa de PCM. Devido à distancia que o PCM está da interface em estudo, o aumento de temperatura entre as massas, na fase de funcionamento de PCM, não é tão implícito como acontece quando o PCM é colocado no condutor. A partir da análise da Figura 25 é possível observar que só com uma espessura de PCM de 4 mm é possível diminuir a temperatura na interface, nos picos de maior corrente. No Anexo 3, está representado o efeito da massa do PCM, na interface condutor/isolador, com o PCM inserido no condutor e na bainha respetivamente.

4.2.4 Efeito da redução do calor latente do PCM.

O calor latente, juntamente com a massa de PCM, define a capacidade de energia que o PCM consegue absorver. Na Figura 26 está representado na blindagem, a variação na história de temperaturas consoante alguns valores de calor latente. Na Tabela 6 estão descritos os parâmetros tidos em consideração para a próxima análise.

Tabela 6 - Parâmetros assumidos para a análise do calor latente do PCM.

Corrente máxima (A)	1500
Calor latente (J/g)	Variável
Massa (g/m)	1214
Diâmetro (mm)	4
Temperatura de fusão (°C)	65

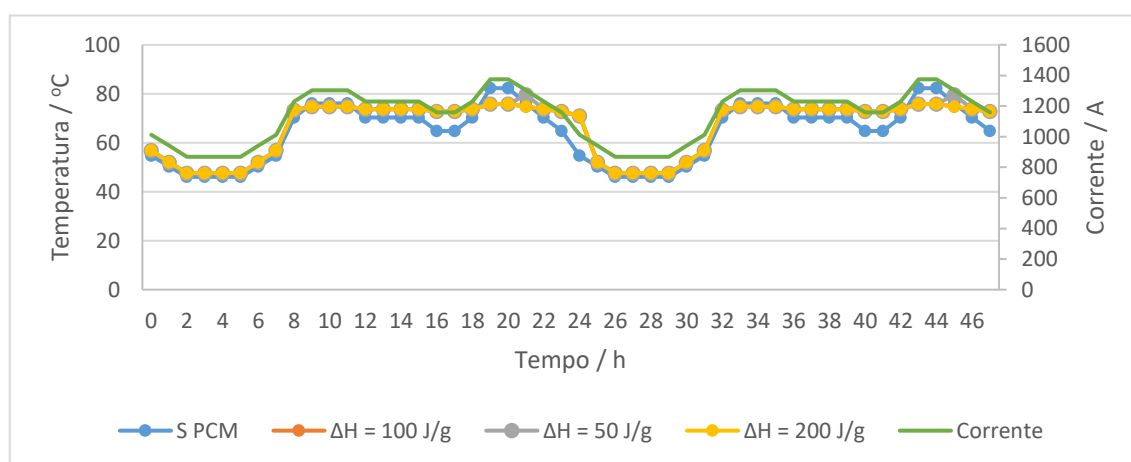


Figura 26 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM na blindagem.

Como é possível observar, com o *PCM* na blindagem, a diminuição de calor latente pode ser desprezado até ao valor de 100 J/g. Isto porque o comportamento para calores latentes superiores a 100 J/g já têm um comportamento semelhante. Neste estado, o *PCM* não atinge o ponto de saturação e vai sempre mantendo a mesma temperatura, exceto quando ocorre a diminuição de corrente. Nessa altura, o *PCM* liberta a energia acumulada, levando a uma diminuição de temperatura. No Anexo 3, está representado o efeito do calor latente do *PCM*, na interface condutor/isolador, com o *PCM* inserido no condutor e na bainha respetivamente.

4.2.5 Efeito da corrente máxima permitida.

Realizada a análise de sensibilidade até este momento, já é possível aferir que tem de haver um compromisso entre a massa, a temperatura de fusão e o calor latente para a blindagem. Na Figura 27 está representado para várias correntes máximas o aumento de temperatura, permitindo assim determinar o aumento máximo de corrente possível consoante a otimização das propriedades referidas. Na Tabela 7 estão descritas as propriedades otimizadas para o melhor rendimento do sistema.

Tabela 7 - Parâmetros assumidos para a análise da corrente máxima no PCM.

Corrente máxima (A)	Variável
Massa (g/m)	1214
Temperatura de fusão (°C)	65
Calor latente (J/g)	100

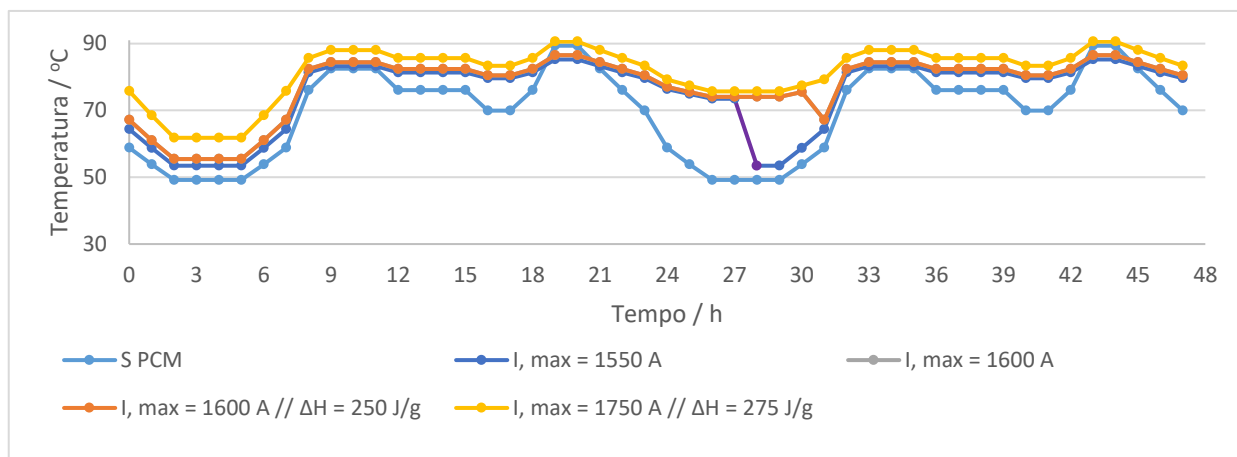


Figura 27 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM na blindagem.

Na Figura 27 está representado o efeito do aumento da corrente no cabo, com o *PCM* inserido na blindagem. Neste cenário, é possível observar que com uma corrente de 1600 A, a interface condutor/isolador nunca atinge a temperatura limite. Com esta corrente máxima, atinge-se um aumento de 10,76 %. No entanto, para aumentar a intensidade de corrente, é necessário aumentar o calor latente, sendo possível atingir uma corrente elétrica máxima de 1750 A, com um calor latente de 275 J/g. No Anexo 3, está representado o efeito corrente máxima permitida, na interface condutor/isolador, com o *PCM* inserido no condutor e na bainha respetivamente.

4.2.6 Efeito das propriedades externas ao cabo.

Após a análise realizada às propriedades do *PCM*, um aspeto importante a ter em consideração é o solo envolvente. As propriedades do solo, como a resistência térmica e a própria temperatura a que o solo está, podem influenciar positivamente a análise do projeto. O preenchimento térmico com materiais de propriedades conhecidas pode melhorar o projeto, dissipando mais calor para o exterior do cabo e assim, aumentar a corrente elétrica no cabo.

4.2.6.1 Resistência térmica do solo.

O solo, como dito no capítulo 2, pode ser constituído por vários materiais, e, portanto, pode ter uma gama alargada da resistência térmica. Nas simulações foi utilizada uma resistência

térmica de 0,5, por este ser um valor médio e um valor para um solo constituído por exemplo por betão de cascalho ou um solo arenoso húmido, que são os materiais mais comuns nesta tecnologia. No entanto, há tipos de solo que têm resistências térmicas superiores e inferiores. Por exemplo, um solo constituído por pedras naturais, como calcário ou mármore, tem uma resistência térmica de 0,4 m·K/W e um solo extremamente seco tem uma resistência térmica muita elevada de 3,33 m·K/W. Na Figura 28 estão representadas as histórias das temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM inserido nas diversas camadas em estudo, sendo elas, no condutor, na blindagem e na bainha, com as propriedades descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros assumidos para a análise da resistência térmica do solo.

Corrente máxima (A)	1750
<i>PCM no condutor</i>	
Massa (g/m)	2867
Temperatura de fusão (°C)	60
Calor latente (J/g)	300
<i>PCM na blindagem</i>	
Massa (g/m)	1214
Temperatura de fusão (°C)	65
Calor latente (J/g)	100
<i>PCM na bainha</i>	
Massa (g/m)	937
Temperatura de fusão (°C)	65
Calor latente (J/g)	100

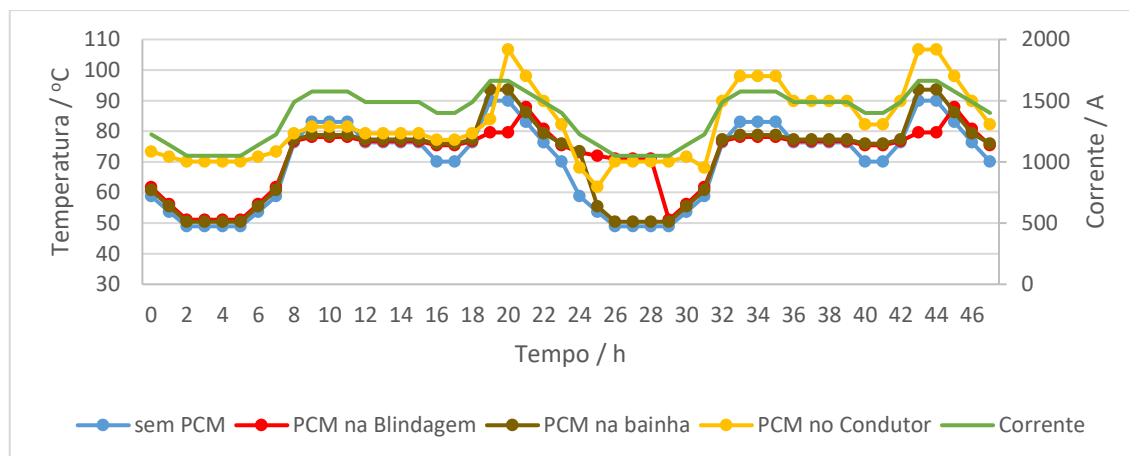


Figura 28 - Comparação das histórias de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM otimizado para cada uma das localizações inseridas, com a resistência térmica do solo de $0,4 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$.

Com a resistência térmica de $0,4 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ foi possível aumentar a corrente máxima até 1750 A até que o melhor cenário atingisse a temperatura máxima de operação. Na Figura 28 observa-se que o melhor cenário foi com o PCM na blindagem, e com o aumento da corrente máxima para 1750 A, registou-se um aumento de 16,67 % de corrente, comparativamente à corrente original.

4.2.6.2 Temperatura do meio envolvente.

Para efeitos de simulação, foi considerado sempre uma temperatura constante do meio envolvente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. No entanto, consoante a estação do ano, será possível que o solo atinja temperatura mais altas ou mais baixas. Uma temperatura do meio envolvente mais baixa, fará com que mais calor do cabo passe para o exterior, o que baixará o perfil de temperaturas ao longo do cabo. Assumindo uma temperatura do meio envolvente de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e as propriedades do PCM, sendo as que estão descritas na Tabela 9, é possível obter a história de temperaturas representada na Figura 29.

Tabela 9 - Parâmetros assumidos para a análise da temperatura do meio envolvente.

Corrente máxima (A)	1670
<i>PCM no condutor</i>	
Massa (g/m)	2867
Temperatura de fusão (°C)	60
Calor latente (J/g)	300
<i>PCM na blindagem</i>	
Massa (g/m)	1214
Temperatura de fusão (°C)	65
Calor latente (J/g)	100
<i>PCM na bainha</i>	
Massa (g/m)	937
Temperatura de fusão (°C)	65
Calor latente (J/g)	100

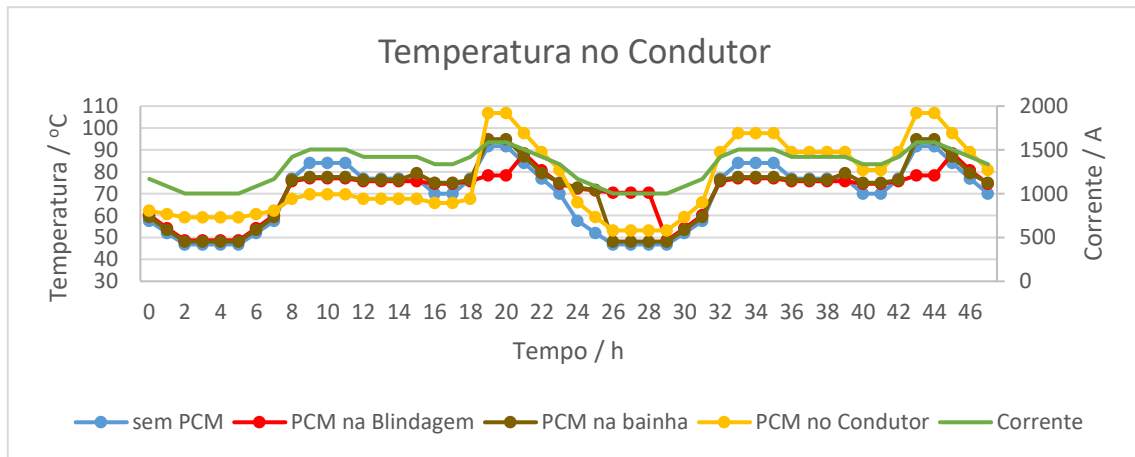


Figura 29 - Comparação das histórias de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM otimizado para cada uma das localizações inseridas, com a temperatura do meio envolvente de 15 °C.

Com a temperatura do meio envolvente de 15 °C, é possível observar que o PCM inserido na blindagem é a melhor opção. Nesta simulação, a corrente máxima atingida foi de 1670 A o que se traduz num aumento de corrente máxima de 11,33 %.

4.3 Simulações com PCM Reais

Após concluída a análise de sensibilidade, já é possível aferir que as propriedades que melhor se adequam a cada localização e a partir daí refinar a lista de PCM. Ao considerar uma temperatura de fusão entre os 60 e os 65 °C e um calor latente entre os 100 e as 200 J/g, da lista de PCM em anexo, foram escolhidos o heptacosano, a cera de abelha, o ácido esteárico, e composto orgânico RT64HC. Na Tabela 10 - Propriedades de PCM, estão representadas as propriedades dos compostos acima descritos.

Tabela 10 - Propriedades de PCM.

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Calor latente (J/g)	Massa volúmica (g/cm ³)
Heptacosano	65	263	0,78
Cera de abelha	61,8	177	0,95
Ácido esteárico	69	202,5	0,85
RT64HC	64	250	0,88

Na Figura 30 está representado a história de temperaturas na interface condutor/isolador. Para além das propriedades de cada PCM, foi considerado uma espessura da camada de PCM de 4 mm e uma corrente máxima de 1580 A.

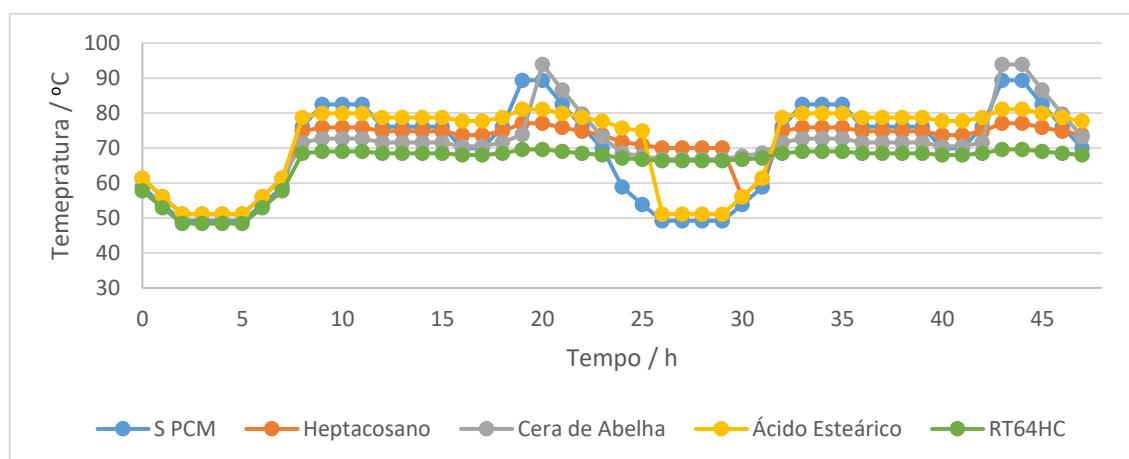


Figura 30 - História de temperaturas de diversos PCM na blindagem, com espessura de 4 mm e corrente máxima de 1580 A.

A partir da Figura 30, é possível verificar que a RT64HC, é a que assume um diferencial de temperaturas mais baixo, de cerca de 19,78 °C, logo, entre estas, seria a melhor opção.

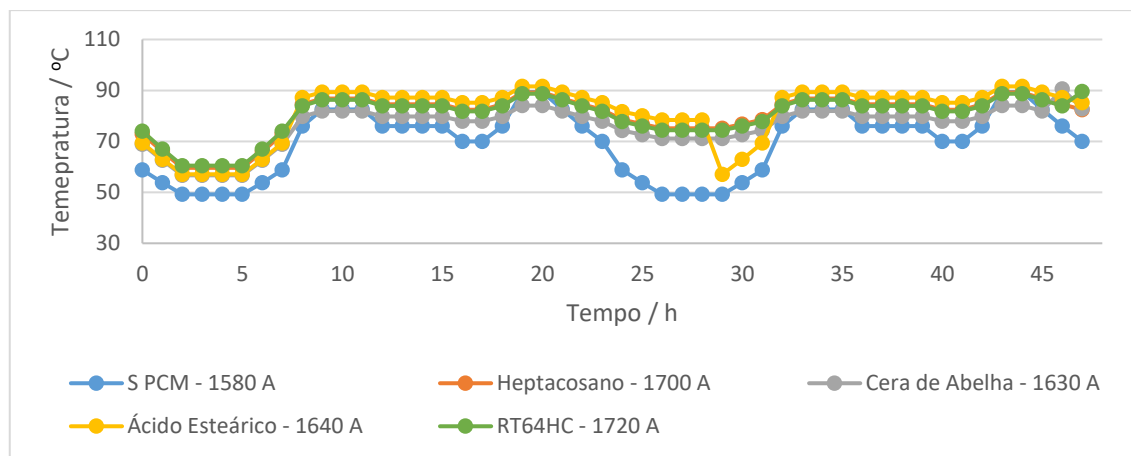


Figura 31 - Intensidade de corrente máxima para cada PCM para atingir a temperatura máxima de operação, com uma espessura de 11 mm de PCM.

A partir da Figura 31, foi possível verificar que com o PCM RT64HC, atingiu uma intensidade de corrente de 1720 A.

4.4 Análise da durabilidade do cabo

O aumento da corrente máxima suportada pelo cabo tem como principal objetivo o aumento do número de anos em que o cabo é utilizado, tendo em conta a previsão de aumento de corrente esperada. Assumiu-se uma corrente inicial do cabo é de 875 A, em que é estimado um aumento de 2 % da corrente por ano, podendo assim ser estimado o tempo de vida do cabo.[19] Na Figura 32 está representado a evolução da corrente ao longo dos anos, tendo em conta que a corrente máxima sem PCM é de 1580 A e a corrente máxima com PCM é de 1720 A.

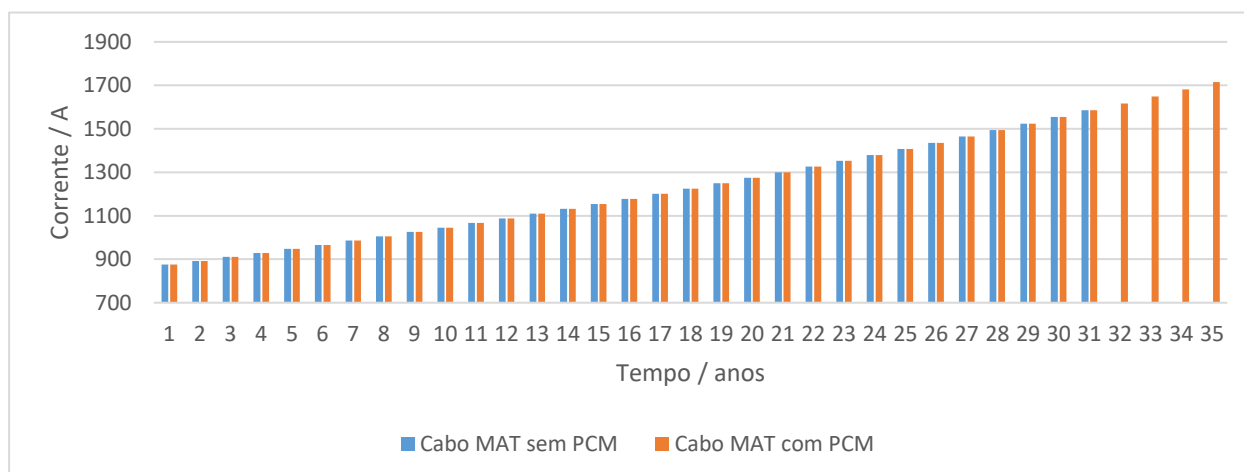


Figura 32 - Evolução da corrente ao longo dos anos para o cabo sem PCM e para o cabo com PCM.

A partir da análise da Figura 32, é possível determinar que o tempo de vida de um cabo sem PCM, será de 31 anos. Já o cabo com PCM, atinge a sua corrente máxima ao fim de 36 anos.

Com esta informação é possível concluir que o cabo com *PCM* pode ter um tempo de vida 3 anos superior ao cabo sem *PCM*.

Foi determinado pelas simulações que o *PCM* começa a beneficiar o sistema, estabilizando a temperatura da interface entre o condutor e o isolador com uma corrente de 1475 A, até então, a temperatura é sempre inferior à temperatura de fusão. Esta corrente é atingida no ano 27. Uma propriedade já referida anteriormente é o número de ciclos que o *PCM* pode estar sujeito sem perder as suas características. Como verificado a partir da história de temperaturas do cabo com *PCM* otimizado, o *PCM* passa por um ciclo de mudança de fase por dia. Com esta informação, podemos concluir que desde que entra em funcionamento, até ao seu tempo de vida útil, o *PCM* passa por 3 285 ciclos. Foi indicado que o custo de fabrico do cabo, sem *PCM*, numa extensão de 4 km, é de 2 900 000 € e os custos de operação do cabo ao longo do seu período de funcionamento é de 688 213 €, o que perfaz um total de 3 588 213 €, ao logo do tempo de operação do cabo.[19] O cabo com *PCM*, numa extensão de 4 km, já pode acarretar um custo de fabrico de 3 200 000 € e os custos de operação, durante o seu período de funcionamento é de 685 535 €, o que no total engloba um custo de 3 885 535 €.[19] No entanto, tendo em consideração o tempo de operação dos próprios cabos, o cabo sem *PCM* teria um custo de 115 749 €/ano e o cabo com *PCM*, teria um custo anual de 107 931 €/ano. Em suma, o cabo com *PCM* pode ter um ganho de 7 818 €/ano, que no fim de 31 anos, se traduz, numa poupança de 242 358 €. Os cálculos estão apresentados no Anexo 4. De referir, que este é apenas um estudo de viabilidade inicial e considerado um ponto de partida para uma otimização futura, pelo que ganhos superiores de rentabilidade são esperados por otimização do tipo de *PCM* e sua localização.

4.5 Set-up Experimental

Nas instalações da Cabelte, foi montada uma instalação para realizar os primeiros testes preliminares. A Figura 33 é uma fotografia tirada no local do *set-up* experiemetal.



Figura 33 - Set-up experimental

Esta experiência consistiu em passar uma determinada corrente, por via de uma bobina, num cabo sem *PCM* e estabelecer como set-point, a temperatura da interface condutor/isolador nesse mesmo cabo. Nas imediações deste cabo, estava outra bobina, a captar a corrente gerada pelo primeiro cabo. Com esta instalação, foi possível definir a temperatura máxima de operação, de 90 °C, e com a mesma corrente a passar nos dois cabos, qual seria a temperatura no cabo com *PCM*.

No início da experiência foi definida uma corrente até ao máximo de 1200 A para que o set-point seja atingido rapidamente. Depois a corrente que passa pelo cabo é definida a partir da temperatura do set-point, e depois é desligada a bobina para depois ser analisado o momento de arrefecimento.

Na Figura 34 estão representadas as histórias de temperaturas na interface condutor/isolador, nos dois cabos.

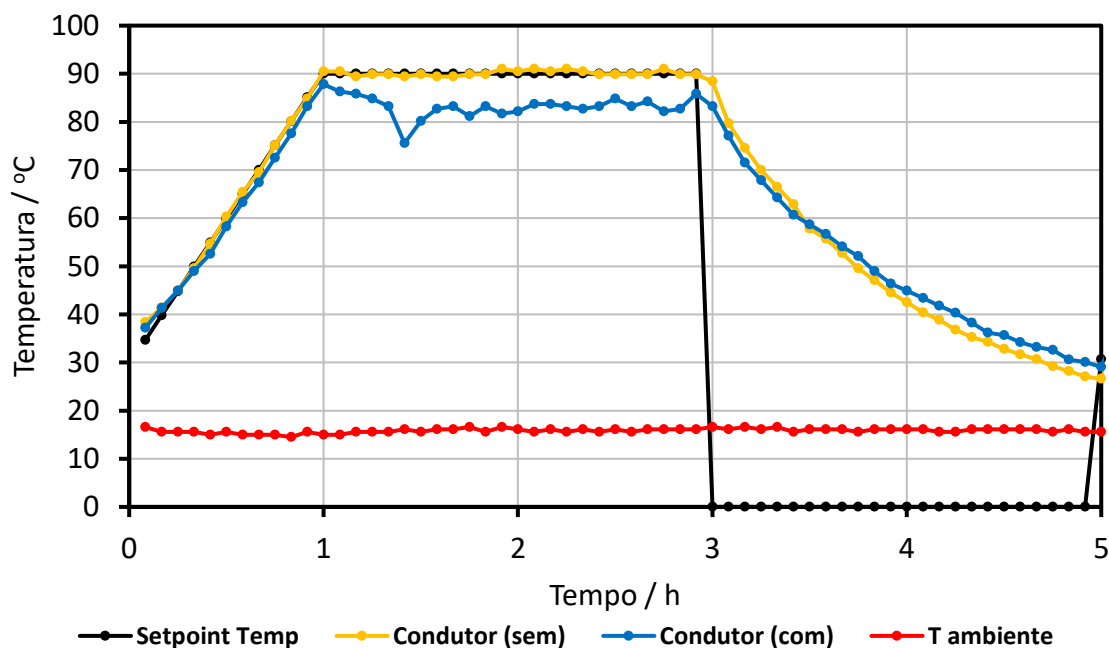


Figura 34 - Comparação de temperatura na interface condutor/isolador, entre o cabo sem *PCM* e com *PCM*.

A partir deste teste, foi possível confirmar que o *PCM* pode vir a ter benefícios, quando implementado num cabo de alta tensão. Num período de máxima corrente, que seria quando o cabo atingisse os 90 °C, sem *PCM*, o cabo com *PCM* garantiu uma redução de aproximadamente 7 % na temperatura da mesma interface.

No entanto, estes testes, ainda não foram possíveis ser comparados com as simulações feitas anteriormente. As condições do meio envolvente são diferentes, bem como as dimensões do cabo.

5 Conclusões

Este projeto teve o objetivo de desenvolver uma nova solução material para os cabos de muita alta tensão para melhorar gestão de calor num cabo de alta tensão, permitindo reduzir a temperatura máxima suportada pelo cabo, aumentando a corrente do cabo. Nesse aspeto, este projeto consistiu na análise teórica de quais os parâmetros ótimos de uma configuração do cabo com o *PCM* e onde dele ele deve ser inserido.

Após a análise de sensibilidade, podemos aferir que a colocação do *PCM* no condutor requer mais massa e um maior calor latente do que o *PCM* inserido na blindagem ou na bainha. Isto acontece por estar mais perto da fonte de calor e ser a primeira camada a reter o calor gerado.

A colocação do *PCM* na bainha requer menos massa comparativamente a todos os outros cenários, no entanto, não é o que regista uma maior redução de temperaturas.

O cenário mais favorável foi na blindagem. Com o *PCM* na blindagem, foi possível verificar que, com uma espessura de *PCM* de 4 mm, uma temperatura de fusão de 65 °C e um calor latente de 275 J/g. Nestas condições, foi possível fazer passar uma corrente máxima de 1750 A, o equivalente a 10,76 % comparativamente à corrente máxima original.

Foi feita uma análise às propriedades exteriores ao cabo, mais propriamente à resistência térmica do solo e à temperatura do meio envolvente. Foi possível observar que estas propriedades podem ter um efeito significativo na análise de desempenho do cabo. Uma redução na resistência térmica do solo de 0,1 mK/W, comparativamente à resistência do solo padrão traduz-se num aumento de 16,67 % na corrente máxima, podendo assim, transportar 1750 A. O decréscimo de 5 °C na temperatura do solo, comparativamente à temperatura padrão, corresponde a uma corrente máxima de 1670 A, o que faz elevar o rendimento em 11,33 %. Se for considerado as duas propriedades do solo em simultâneo, obtém-se uma corrente máxima de 1870 A, correspondendo a um aumento de 22,33 % da corrente máxima, em função da corrente máxima padrão.

Após simular a história de temperaturas na interface condutor/isolador, com as propriedades de *PCM* reais, é possível concluir que a o RT64HC, seria a melhor escolha, entre as testadas para ser inserida na blindagem, com 11 mm de espessura, atingindo uma intensidade de corrente máxima de 1720 A.

Em relação à durabilidade do cabo com *PCM*, foi possível concluir que este pode operar durante mais 5 anos de utilização comparativamente ao cabo sem *PCM*. O *PCM*, durante o tempo de operação, passará por 3 285 ciclos, podendo por isso representar uma solução económica muito vantajosa.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

Neste projeto, era fundamental desenvolver uma boa base de análise das implicações que o *PCM* teria na introdução do cabo. Neste aspeto, este documento presta uma boa análise aos parâmetros a ter em consideração para a incorporação do *PCM* no cabo *MAT*. Foi por isso desenvolvido uma ferramenta muito relevante para o projeto preliminar do cabo contendo esta solução.

Limitações e Trabalho Futuro

As simulações realizadas para este documento, foram baseadas no modelo térmico em estado estacionário. De futuro, um estudo com o modelo em estado transiente pode levar a resultados mais aproximados da realidade, permitindo avaliar se os efeitos dinâmicos, embora expetavelmente pouco significativos, podem influenciar a solução desenvolvida. Com estas simulações em consideração, pertence a trabalho futuro validar experimentalmente estes resultados, para depois ser possível extrapolar a partir da simulação o comportamento de mais materiais para a função de *PCM*.

6.2 Apreciação Final

Este projeto foi aliciante porque obrigou a ir mais além nos conhecimentos de transferência de calor. Foi realizada uma boa base para que nas próximas fases do projeto seja possível avançar com mais segurança até ao produto final.

7 Referências

1. Ocloń, P., et al., *Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil*. Energy Conversion and Management, 2015. **95**(0): p. 352-370.
2. Fromm, U., *Optimized Conductors for XLPE Cables With a Large Cross-Section*. European Transactions on Electrical Power, 2005. **15**: p. 109-121.
3. Dubois, D. and P. Mirebeau. *The use of insulated wires milliken conductors in high voltage power transmission underground AC lines*. in *Jicable*. 2007.
4. Boone W., *One Cable per Phase for EHV Systems*. 2014, European Copper Institute.
5. Hanna, M.A., Chikhani A. Y., Salama, M. M. A., *Thermal Analysis Of Power Cables In Multi-Layered Soil*. 1993. **8**(3): p. 772-778.
6. Argaut, P., Bjorlow-Larsen, K., Zaccone, E., Gustafsson, A., Schell, F., Wasch, V. , *Large Projects Of EHV Underground Cable Systems*.
7. Farid, A.M., Farid, M. M., *Review of Recent Patents Related to Electrical Cable Cooling*. 2009.
8. Brakelmann, H., Wasch, V., *Gravitational Cooling of Cable Installations*. 9th International Conference on Insulated Power Cables, 2015.
9. Thakare K.A., B.A.G., *REVIEW ON LATENT HEAT STORAGE AND PROBLEMS ASSOCIATED WITH PHASE CHANGE MATERIALS*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015.
10. Zhao, W., *Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage*. 2013, Lehigh University.
11. Baetens, R., B.P. Jelle, and A. Gustavsen, *Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review*. Energy and Buildings, 2010. **42**(9): p. 1361-1368.
12. Sharma, R.K., et al., *Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage*. Energy Conversion and Management, 2015. **95**: p. 193-228.
13. Reyes, A., A. Mahn, and F. Vásquez, *Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material*. Energy Conversion and Management, 2014. **83**: p. 241-248.
14. Wu, W.-f., et al., *Study on the effect of shape-stabilized phase change materials on spacecraft thermal control in extreme thermal environment*. Energy Conversion and Management, 2013. **69**(0): p. 174-180.
15. Fok, S.C., W. Shen, and F.L. Tan, *Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks*. International Journal of Thermal Sciences, 2010. **49**(1): p. 109-117.
16. Commission, I.E., *Calculation of the Current Rating*. IEC - 60287, 2006.
17. Lindstrom, L., *Evaluating Impact on Ampacity According to IEC-60287 Regarding Thermally Unfavourable Placement Of Power Cables*. 2011.
18. Cabelte, *Especificação das Condições de Operação dos Cabos de Muito Alta Tensão* 2016.
19. Saraiva, J.T., Ferreira, J. R. P., *Avaliação do Interesse Económico da Instalação de Cabos de Alta Tensão de Elevado Rendimento, CATER, por comparação com soluções tradicionais*. 2015.

Anexo 1 Lista de PCM

Tipo	PCM	θ_f (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Densidade (g/cm ³)	Pressão de vapor (Pa)	Peso Molecular (g/mol)	Viscosidade a temp. processo (cP)
Parafinas (orgânicos)	Hexacosano	59	256	0,778	$2,37 \cdot 10^{-5}$	366,71	<10
	Heptacosano	65	263	0,78	-	380,74	
	Hentriacontano	68	235	0,781 (68 °C)	-	436,85	
	Heptatriacontano	77	240	0,815		520,99	
	Octatriacontano	79	251	0,816		535,03	
Não parafinas: álcoois, anidridas, acetonas, etc. (orgânicos)	Cera de abelhas	61,8	177	0,95		677,22	
	Alfa naftol	96	163	1,095		144,17	
	Quinona	115	171	1,318		108,1	
	Acetanilida	118,9/115	222/142	1,21	2 (20 °C)	135,2	
	Anidrida succinica	119	204	1,23		100,1	
	Ácido benzóico	121,7	142,8	1,2659 g/cm ³ (15 °C);	0,16 (25 °C); 0,19 kPa (100 °C)	122,1	
	Stilbeno	124	167	1,164		180,3	
	Benzamida	127,2	169,4	1,341		121,1	
	Fenacetina	137	136,7	1,24		179,2	
Glucose alfa	141	174	-		180,2		
Ácidos gordos (orgânicos)	Ácido acético	16,7	184	1,05	2,11kPa (25 °C)	60,1	0,45cP (100°C)
	Glicol polietílico	20-25	146	1,1		18,02	
	Ácido láurico	49	178	1,007 (s) 0,862(l)	$2,13 \cdot 10^{-6}$ kPa (25 °C)	200,3	6,88 cP (50 °C) 5,37 cP (60 °C)
	Ácido mirístico	58	199	0,99 g/cm ³ (24 °C); 0,8622 g/cm ³ (54 °C)	0,01 kPa (118 °C)	228,4	7,21 cP (60 °C)
	Ácido esteárico	69	202,5	0,9408 (20 °C) 0,847 (70 °C)	0,01 kPa (158 °C)	284,5	7cP (82°C)

Tipo	PCM	θ_f (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Densidade (g/cm ³)	Pressão de vapor (Pa)	Peso Molecular (g/mol)	Viscosidade a temp. processo (cP)
	Acetamida	81	241	1.159	1,3	59,1	2,052 cP (91 °C)
Hidretos de sais (inorgânicos)	Al(NO ₃) ₂ *9H ₂ O	72	155	1,72		375,1	Viscosidade de ordem de grandeza da água
	Ba(OH) ₂ *8H ₂ O	78	265	2,18 (16 °C)		315,5	
	Mg(NO ₃) ₂ *6H ₂ O	89.9	167	1,464		256,4	
	Kal(SO ₄)*12H ₂ O	91	184	1,725		474,4	
	LiCl*H ₂ O	99	212	2,068	0,13 kPa (785 °C)	42,4	
	MgCl ₂ *6H ₂ O	117	167	1,569		203,3	
	NaC ₂ H ₃ O ₂ *3H ₂ O	137	172	1,45 (20 °C)		136,1	
Metálicos (inorgânicos)	Galium	30	80.1	5,907	1 Pa a 1310 K	69,7	
	Cerrow eutectic	58	90.9	-			
	Bi-Cd-In eutectic	61	25	-			
	Bi-Pb-In eutectic	70	29	-			
	Bi-In eutectic	72	25	-			
Eutéticos	trietiloxetano+urea	29,8	218	-			
	Nitrato e cloreto de magnésio, hidratados (Mg(NO ₃) ₃ *6H ₂ O+MgCl ₂ *6H ₂ O)	59,1	144	1,550 (50 °C)			
	Nitrato de magnésio e nitrato de alumínio, hidratados (Mg(NO ₃) ₃ *6H ₂ O+Al(NO ₃) ₂ *9H ₂ O)	61	148	1,85			
	Naftalene+ácido benzóico	67	123,4	-			
	LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	81.6	108	-			

Anexo 2 Cálculo dos calores gerados no cabo.

1.1 Cálculo do calor gerado no condutor.

Para calcular o calor gerado do condutor foi necessário, primeiramente calcular a resistência elétrica do condutor. A resistência elétrica do condutor à temperatura máxima de operação é calculada por:

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \Leftrightarrow R' = 5,44 \times 10^{-6}[1 + 3,93 \times 10^{-3}(90 - 20)] \Leftrightarrow R' = 6,94 \times 10^{-6} \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

O fator relativo ao efeito peculiar é calculado a partir de:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s \Leftrightarrow x_s = \sqrt{\frac{8 \times \pi \times 60}{6,94 \times 10^{-6}} \times 10^{-7} \times 0,435} \Leftrightarrow x_s = 3,08$$

Com o fator relativo ao efeito peculiar calculado, é possível calcular o efeito peculiar por:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \Leftrightarrow y_s = \frac{3,08^4}{192 + 0,8 \times 3,08^4} \Leftrightarrow y_s = 0,339$$

Analogamente, o efeito de proximidade, a partir do fator relativo ao efeito de proximidade:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p \Leftrightarrow x_p = \sqrt{\frac{8 \times \pi \times 60}{6,94 \times 10^{-6}} \times 10^{-7} \times 0,37} \Leftrightarrow x_p = 1,73$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow y_p = \frac{1,73^4}{192 + 0,8 \times 1,73^4} \left(\frac{0,0635}{0,131} \right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{0,0635}{0,131} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{1,73^4}{192 + 0,8 \times 1,73^4} + 0,27} \right] \Leftrightarrow y_p = 0,04$$

Por fim, a resistência elétrica é calculada a partir de:

$$R = R'(1 + y_p + y_s) \Leftrightarrow R = 6,94 \times 10^{-6}(1 + 0,04 + 0,339) \Leftrightarrow R = 9,6 \times 10^{-6} \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

O calor gerado pelo condutor é calculado, finalmente por:

$$Q = 1500^2 \times 9,6 \times 10^{-6} \Leftrightarrow Q = 21,53 \text{ W/m}$$

1.2 Cálculo do calor gerado no isolador.

O calor gerado no isolador é calculado da seguinte forma:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \times \ln\left(\frac{d_i}{d_c}\right)} \cdot 10^{-9} \Leftrightarrow C = \frac{3}{18 \times \ln\left(\frac{0,1147}{0,0635}\right)} \cdot 10^{-9} \Leftrightarrow C = 2,3 \times 10^{-10} \text{ (F/m)}$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f \Leftrightarrow \omega = 2 \times \pi \times 60 \Leftrightarrow \omega = 377$$

$$W_d = \omega \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \text{tg } \delta \Leftrightarrow W_d = 377 \times 2,3 \times 10^{-10} \times 127000^2 \times 0,001 \Leftrightarrow W_d = 1,43 \text{ (W/m)}$$

1.3 Cálculo do calor gerado na blindagem.

Primeiramente é necessário calcular a relação entre a distancia entre as almas condutoras dos diferentes cabos da instalação e o diâmetro médio da blindagem:

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \Leftrightarrow X = 2 \times 377 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2 \times 0,131}{0,011}\right) \Leftrightarrow X = 2,39 \times 10^{-4}$$

Para calcular o fator de perdas na blindagem, é necessário, antes, calcular as corrente circulantes:

$$\lambda'_1 = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{X}\right)^2} \Leftrightarrow \lambda'_1 = \frac{6,94 \times 10^{-6}}{9,6 \times 10^{-6}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{6,94 \times 10^{-6}}{2,39 \times 10^{-4}}\right)^2} \Leftrightarrow \lambda'_1 = 0,72$$

O fator de perdas na blindagem pode ser calculado a partir de:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \Leftrightarrow \lambda_1 = 0,72 + 0 \Leftrightarrow \lambda_1 = 0,72$$

Finalmente, o calor gerado na blindagem é calculado a partir de:

$$Q = I^2 R \cdot \lambda_1 \Leftrightarrow Q = 1500^2 \times 9,6 \times 10^{-6} \times 0,72 \Leftrightarrow Q = 15,50 \text{ (W/m)}$$

Anexo 3 Análise de Sensibilidade complementar

3.1 Efeito das temperaturas de fusão e de solidificação do PCM:

Parâmetros considerados:

- Corrente máxima de 1500 A;
- Calor latente de 200 J/g;
- Massa de PCM é a equivalente a 2 mm de espessura. No condutor tem 319 g/m, na blindagem, 597 g/m e na bainha 620 g/m.

Efeito da temperatura no condutor:

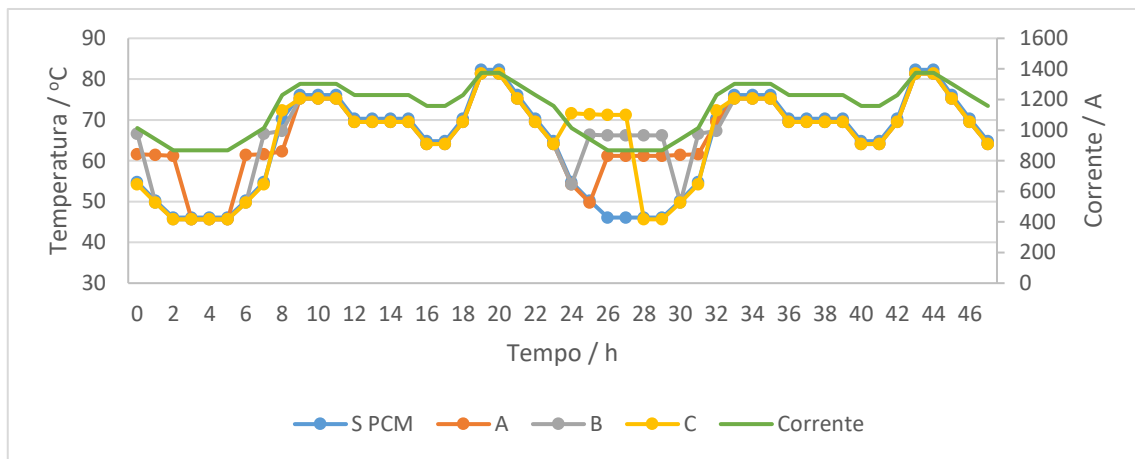


Figura 35 - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM no condutor.

A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70°C.

Efeito da temperatura na bainha:

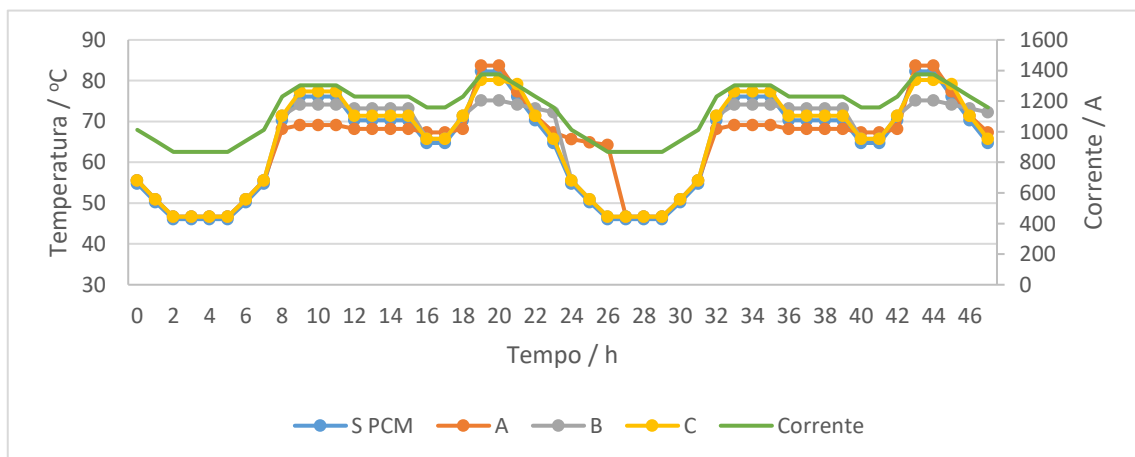


Figura 36 - - Efeito da temperatura na interface condutor/isolador com o PCM na bainha.

A - 60 °C; B - 65 °C; C - 70 °C.

3.2 Efeito da massa de PCM.

Parâmetros considerados:

- Corrente máxima de 1500 A;
- Calor latente de 200 J/g;
- Temperatura de fusão do PCM no condutor é 60 °C e a Temperatura de fusão do PCM na bainha é 65 °C

Efeito da massa no condutor:

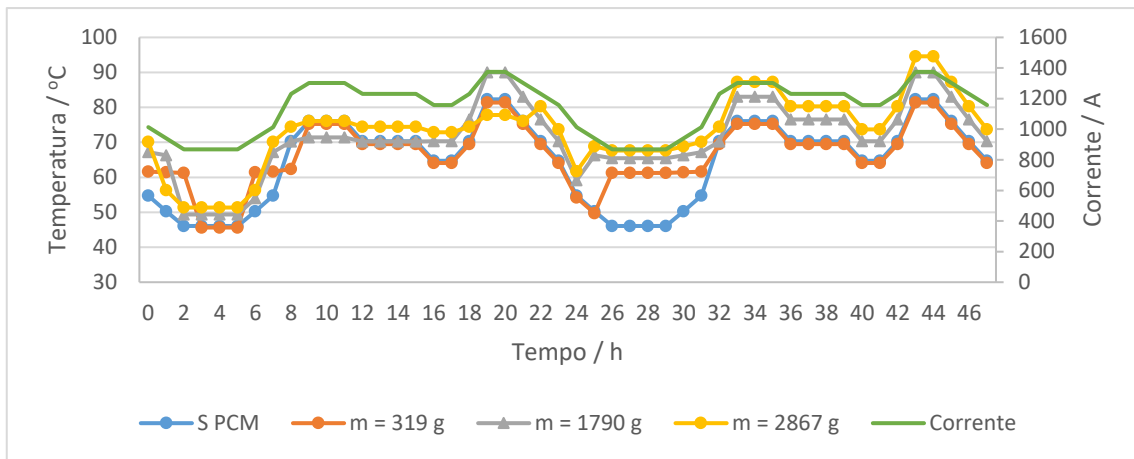


Figura 37 - Efeito da massa de PCM na interface condutor/isolador, com o PCM no condutor.

Efeito da massa na bainha:

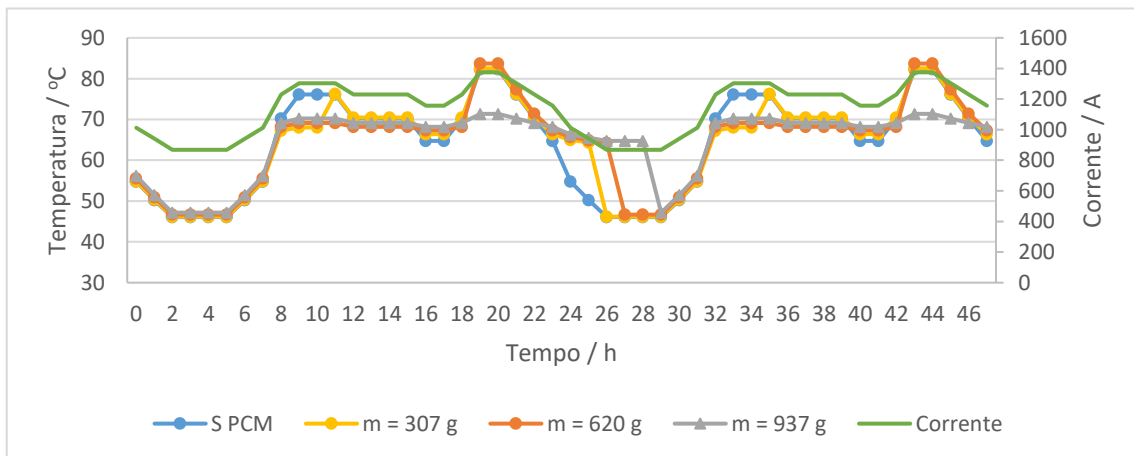


Figura 38 - Efeito da massa de PCM na interface condutor/isolador, com o PCM na bainha.

3.3 Efeito do calor latente do PCM.

Efeito do calor latente no condutor:

- Corrente máxima de 1500 A;
- Temperatura de fusão do PCM no condutor é 60 °C;
- Massa de PCM 2867 g/m.

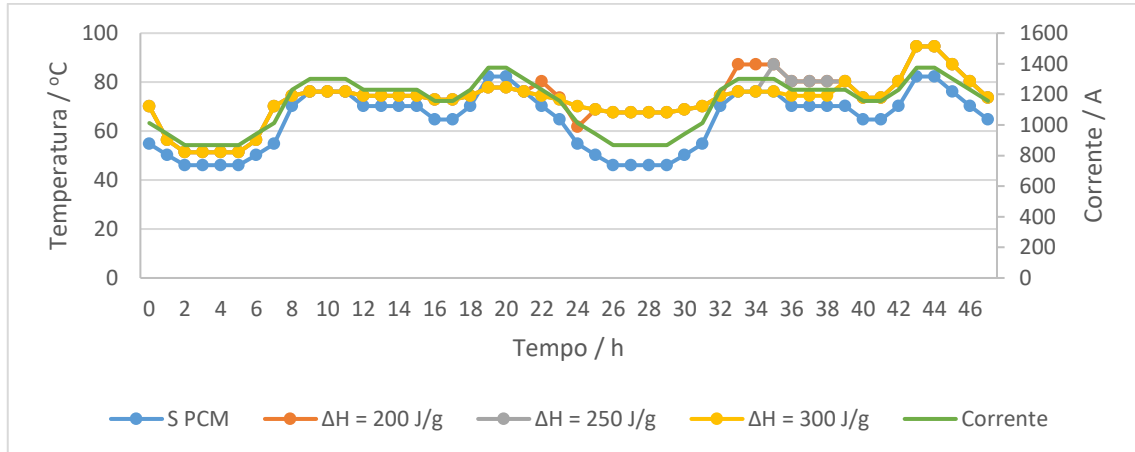


Figura 39 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM no condutor.

Efeito do calor latente na bainha:

- Corrente máxima de 1500 A;
- Temperatura de fusão do PCM no condutor é 65 °C;
- Massa de PCM 937 g/m.

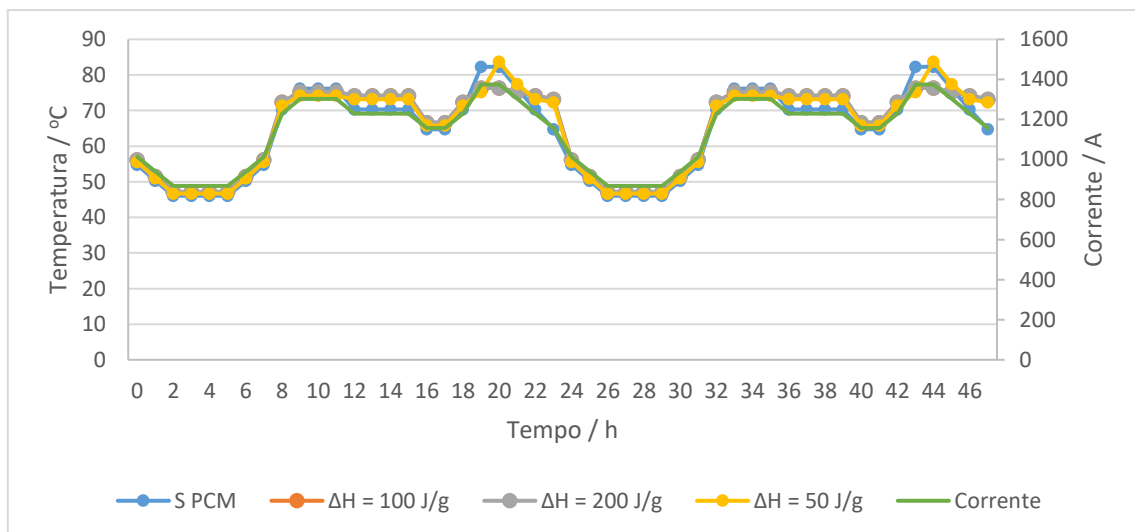


Figura 40 - Efeito do calor latente na história de temperaturas na interface condutor/isolador, com o PCM na bainha.

3.4 Efeito da corrente máxima permitida.

Efeito da corrente máxima no condutor.

- Calor latente de 300 J/g;
- Temperatura de fusão do PCM no condutor é 60 °C;
- Massa de PCM 2867 g/m.

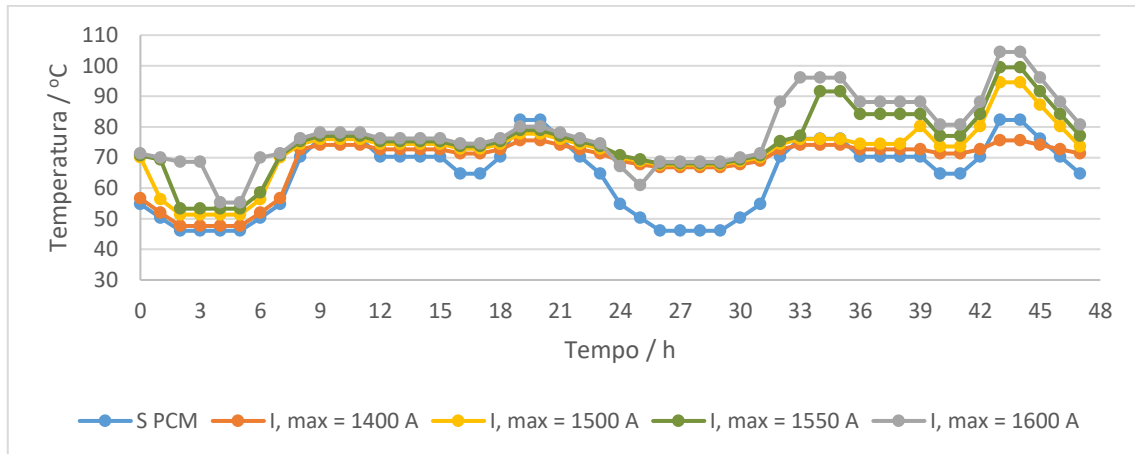


Figura 41 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM no condutor.

Efeito da corrente máxima permitida na bainha.

- Calor latente de 100 J/g;
- Temperatura de fusão do PCM no condutor é 65 °C;
- Massa de PCM 937 g/m.

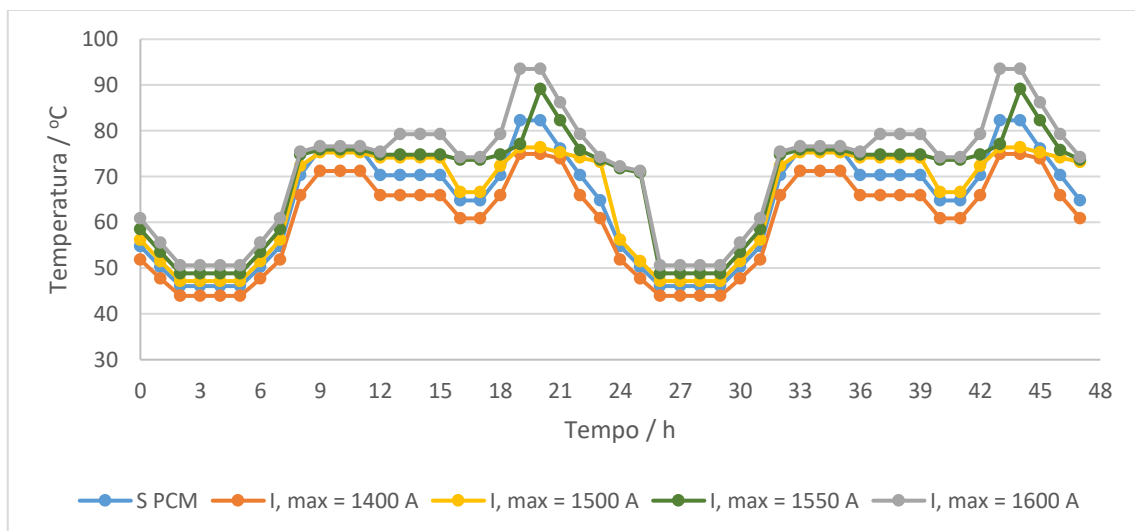


Figura 42 - Efeito da corrente na interface condutor/isolador, com PCM na bainha.

Anexo 4 Analise económica

- Para um cabo tradicional, sem *PCM*:

- Custo de fabrico e de instalação: 2 900 000 €

- Custo de operação: 688 213 €

- **Custo total:** 2 900 000 + 688 213 = 3 588 213 €

Tempo de operação: 31 anos

Custo anual: $C_A = \frac{3\,588\,213}{31} = 115\,749 \text{ €/ano}$

- Para um cabo com *PCM*:

- Custo de fabrico e de instalação: 3 200 000 €

- Custo de operação: 685 535 €

- **Custo total:** 3 200 000 + 685 535 = 3 885 535 €

Tempo de operação: 32 anos

Custo anual: $C_A = \frac{3\,885\,535}{36} = 107\,931 \text{ €/ano}$

Lucro do cabo com *PCM* relativamente ao cabo sem *PCM*

$L_A = 115\,749 - 107\,931 = 7\,818 \text{ €/ano}$

O lucro ao fim do tempo de operação do *PCM*:

$L_T = 7\,818 \times 31 = 242\,358 \text{ €}$

