

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SIMULAÇÃO DE SISTEMA PARA AQUECIMENTO DE PISO DE CÂMARAS FRIAS E  
ANÁLISE COMPARATIVA COM PROJETO EXISTENTE

por

Rodrigo Cioba Bertuol

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, fevereiro de 2024

#### CIP - Catalogação na Publicação

Bertuol, Rodrigo Cioba  
Simulação de sistema para aquecimento de piso de  
câmaras frias e análise comparativa com projeto  
existente / Rodrigo Cioba Bertuol. -- 2024.  
15 f.  
Orientador: Cirilo Seppi Bresolin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Aquecimento de piso. 2. Câmaras frias. 3. Energy  
2D. I. Bresolin, Cirilo Seppi, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rodrigo Cioba Bertuol

SIMULAÇÃO DE SISTEMA PARA AQUECIMENTO DE PISO DE CÂMARAS FRIAS E  
ANÁLISE COMPARATIVA COM PROJETO EXISTENTE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof. Cirilo Seppi Bresolin (Presidente)

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Francis Henrique Ramos França

Prof<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, fevereiro de 2024

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Cirilo Seppi Bresolin, por toda a atenção, ensinamentos e conselhos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua participação foi fundamental. À minha família e amigos pelo apoio, incentivo e companheirismo sempre presentes. À empresa SPM Engenharia pela disponibilização de material que foi de grande utilidade. Aos professores Alexandre Vagtinski de Paula, Francis Henrique Ramos França e Letícia Jenisch Rodrigues por aceitarem o convite de fazer parte do processo de avaliação deste trabalho.

Bertuol, Rodrigo. **Simulação de sistema para aquecimento de piso de câmaras frias e análise comparativa com projeto existente**. 2024. 11. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

Projetos de sistemas de aquecimento de piso para prevenir o congelamento da água contida no solo são primordiais em câmaras frias que operem em temperaturas negativas. A expansão volumétrica da água ao se solidificar pode ocasionar problemas à infraestrutura. O presente trabalho estuda o problema do aquecimento de piso de um centro de distribuição refrigerado em que houve falha de projeto, ocasionando em prejuízos ao estabelecimento. Com o auxílio do software Energy 2D, é proposto um modelo simplificado do sistema, a fim de simular, testar o seu funcionamento em diversos cenários e avaliar o desempenho de uma ferramenta simples de modelagem computacional ao auxiliar em problemas de engenharia. Os resultados são validados com a análise dos dados obtidos, além da comparação aos valores indicados por um relatório técnico contratado pela empresa, onde foi constatado que cada tubo deve fornecer, pelo menos, 3,75 W/m de calor. Os resultados das simulações apontam para números semelhantes, com a transferência de ao menos 1,57 W/m de calor por tubo sendo suficiente para manter o solo em temperaturas positivas por 90 dias, próximo ao regime constante.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento, câmara fria, Energy 2D, piso, simulação.

Bertuol, Rodrigo. **Frost heave prevention system simulation on a cold storage room and comparative analysis to existing project**. 2024. 11. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## ABSTRACT

Designs of frost heave prevention systems are essential in cold storage rooms that operate at negative temperatures. The volumetric expansion of water when it solidifies can cause infrastructure problems. The present work studies the problem of floor heating in a refrigerated distribution center in which there was a design failure, causing disruption and damage to the establishment. With the help of Energy 2D software, a simplified model of the system is proposed in order to simulate, test the operation in different scenarios and evaluate the performance of a simple computational modeling tool in assisting with engineering problems. The results are validated by analyzing the data obtained, in addition to comparing them with the values indicated by a technical report contracted by the company, which found that each tube must provide at least 3.75 W/m of heat. The simulation results point to similar numbers, with the transfer of at least 1.57 W/m of heat per tube being sufficient to maintain the soil at positive temperatures for 90 days, close to the constant regime.

**KEYWORDS:** Cold storage, Energy 2D, Frost heave, Heating, Simulation

## NOMENCLATURA

### Símbolos

A	Área	[m <sup>2</sup> ]
$Q$	Calor	[W]
$c_p$	Calor específico	[J/kg °C]
cm	Centímetro	
L	Comprimento	[m]
$k$	Condutividade térmica	[W/m °C]
$q''$	Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
°C	Grau Celsius	
J	Joule	
m	Metro	
min	Minuto	
$\Delta t$	Passo de tempo	[s]
ft	Pé	
kg	Quilograma	
r	Raio	[m]
s	Segundo	
$\dot{q}$	Taxa de geração volumétrica de calor	[W/m <sup>3</sup> ]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[s]
V	Volume	[m <sup>3</sup> ]
W	Watt	
Símbolos gregos		
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\pi$	Pi	

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
2.1 CONDUÇÃO TRANSIENTE .....	3
2.2. EQUAÇÃO DA DIFUSÃO DO CALOR .....	4
2.3. MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS.....	4
<b>3. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>4</b>
3.1. DESCRIÇÃO DA MODELAGEM DO SISTEMA.....	5
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>7</b>
4.1. TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE PASSO DE TEMPO .....	7
4.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO.....	8
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>12</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>14</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O problema proposto para a realização do presente trabalho trata-se de uma análise computacional de sistemas para aquecimento de piso de câmaras frias, situação comum na indústria em setores como o alimentício ou de logística, por exemplo. A proposta surgiu ao se analisar um projeto de uma câmara fria de grandes proporções localizada na cidade de Curitiba, Paraná, em que houve falha no sistema aquecimento de piso, causando diversos transtornos à empresa em questão.

Ao se realizar projetos de câmaras frias que operem a temperaturas abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , deve-se avaliar a formação de lentes de gelo no solo abaixo da infraestrutura da câmara. Mesmo que o perfil de construção dos pisos traga um grande isolamento térmico, a longo prazo a tendência é de que as baixas temperaturas atinjam o nível do solo, podendo gerar o congelamento da água presente nele. Desta forma, a água solidificada pode causar danos à infraestrutura do piso e pilares do estabelecimento devido à expansão volumétrica inerente ao processo. Os efeitos negativos resultantes podem ser verificados dentro do próprio ambiente operacional até mesmo a olho nu, com a formação de desníveis e rachaduras. Além de comprometer a integridade da infraestrutura, conforme representado na Figura 1, o piso danificado ainda pode gerar diversos outros problemas como, por exemplo, dificultar o deslocamento de empilhadeiras e até mesmo causar o desabamento de porta paletes ou estantes.

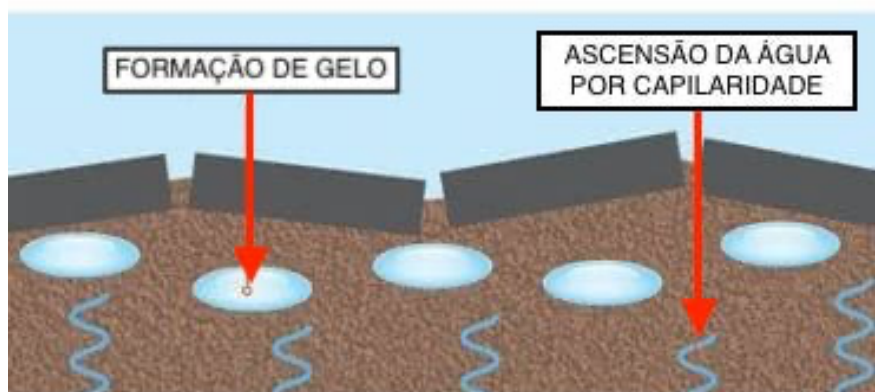


Figura 1 Formação de gelo no solo, afetando a construção do piso. Adaptado de The Constructor (2021).

No projeto do centro de distribuição refrigerado da empresa em questão, a ser detalhado mais a frente no trabalho, optou-se pela utilização de ventilação natural por meio tubos de polietileno de alta densidade, com 20 centímetros de diâmetro e 48 metros de extensão, como forma de prevenir o congelamento da água presente no solo. Estes tubos foram espaçados em 100 centímetros centro-a-centro, e distribuídos ao longo de toda a edificação. Prontamente já é possível perceber uma inconsistência. Conforme recomendações da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*), em seu *handbook Refrigeration* (2019), sistemas de tubos devem ser complementados com ventiladores e alguma fonte de calor em casos que os tubos ultrapassem 30 metros de comprimento. Em laudo técnico realizado neste centro refrigerado, é possível visualizar a formação de gelo dentro dos tubos. A Figura 2 apresenta o interior obstruído com gelo de um tubo, na faixa de 18 metros distante do meio externo. Precisamente nesta região é possível observar o levantamento do piso no interior da câmara, indicando que houve solidificação da água contida no solo, gerando expansão geométrica.

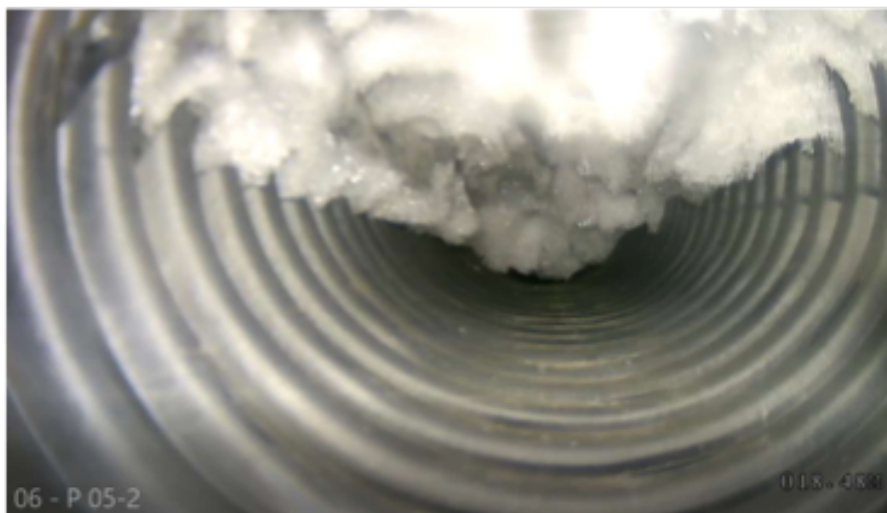


Figura 2 Laudo técnico realizado em que mostra a formação de gelo na seção do tubo da câmara fria em questão.

Dada a ocorrência do problema, a correção do projeto pode se tratar de uma ação complexa de se realizar visto que esses ambientes geralmente não podem deixar de operar por longos períodos, podendo ocasionar em grandes custos. A partir disso, tem-se a importância de não se negligenciar esta seção do projeto. A aplicação de mecanismos para o aquecimento de piso pode se dar por diversas maneiras, como: ventilação natural, ventilação forçada, resistências elétricas, ar ou outro fluido aquecido, dentre outras possibilidades. A escolha vai depender de fatores como a dimensão da câmara fria, o orçamento dedicado para instalação, operação e manutenção, e o nível de segurança desejado para a efetividade do sistema.

O trabalho de Sanford e Rahn (2022) apresentou um levantamento a respeito dos métodos mais utilizados por experientes projetistas de câmaras frias ao longo de todo o território dos Estados Unidos da América. É possível notar que a utilização de ventilação natural é controversa até mesmo para estabelecimentos menores, da ordem de até 10.000 ft<sup>2</sup> (equivalente a pouco menos de 930 m<sup>2</sup>). Ainda assim, é apontado que alguns especialistas consideram como uma escolha viável dentro de certas condições, por exemplo um clima mais quente. A ventilação forçada também aparece como uma solução recorrente nesse cenário, enquanto que para climas mais frios a escolha tende a ser por resistências elétricas. Ao tratar-se de projetos com maiores dimensões, percebe-se um distanciamento da utilização de ventilação e cada vez mais casos recorrem a resistência elétrica e, também, a utilização de glicol, sendo este o método mais utilizado para casos em que a câmara ultrapassa os 100.000 ft<sup>2</sup> (9.300 m<sup>2</sup>). A Tabela 1, adaptada de Sanford e Rahn (2022), mostra uma comparação de custos e riscos entre os métodos mais utilizados.

Tabela 1 – Custos e riscos para os métodos de prevenção de formação de lentes de gelo no solo (Sanford e Rahn, 2022)

<b>Método de prevenção</b>	<b>Custo de instalação</b>	<b>Custo de operação</b>	<b>Risco de falhas</b>
<b>Ventilação natural</b>	Médio	Baixo	Alto
<b>Ventilação forçada</b>	Alto	Médio	Médio
<b>Sistema elétrico</b>	Baixo	Alto	Baixo
<b>Glicol forçado</b>	Médio	Médio	Baixo

Erros de projeto, como o que motivou este trabalho, podem gerar muitos transtornos. Entretanto, com o auxílio de uma ferramenta simples de modelagem computacional, eles poderiam ser previstos e evitados? Este trabalho tem como objetivo analisar, com o auxílio do software Energy 2D (CHARLES XIE, 2012) e propondo uma abordagem simplificada do sistema, diferentes cenários do problema proposto. Discutir a respeito da validade das soluções encontradas pelo método numérico, além de comparar os resultados com os obtidos pelo relatório técnico contratado pela empresa.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O centro de distribuição refrigerado foi projetado para operar com uma temperatura interna de  $-18^{\circ}\text{C}$ . A partir da necessidade de isolamento do piso, este foi construído com duas camadas de concreto (20 e 10 cm) intercaladas por duas camadas de 10 cm de poliestireno expandido (material isolante). Abaixo foi adicionado uma camada de 50 cm de sub-base granular, onde foram instalados os tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) para o sistema de aquecimento de piso. A Figura 3 representa a construção da seção transversal do piso, enquanto a Figura 4 apresenta um recorte da planta baixa da câmara frigorífica, com destaque para os tubos, em coloração avermelhada, atravessando o estabelecimento de extremidade a extremidade.

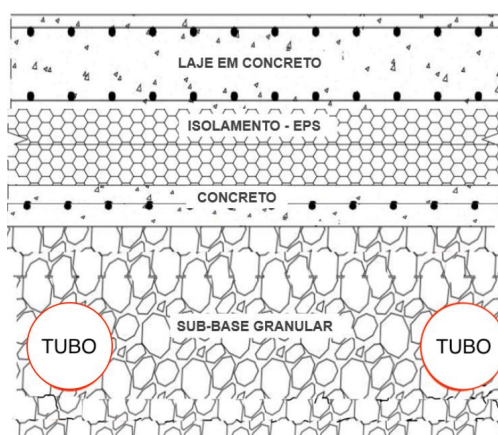


Figura 3 Representação da seção transversal da construção do piso.

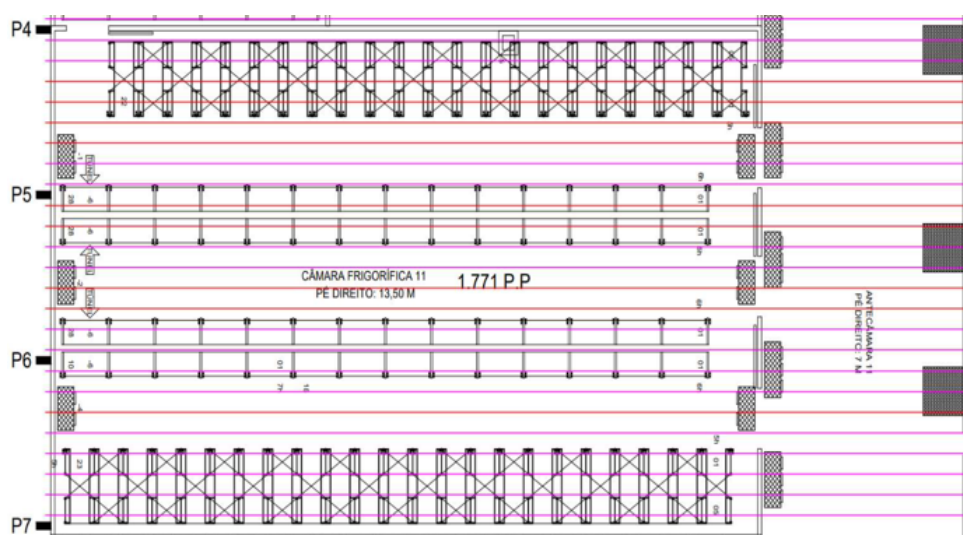


Figura 4 Recorte da planta baixa da câmara fria, com destaque para os tubos.

A fim de evitar e prevenir erros em projetos e consequente prejuízo financeiro, o presente trabalho propõe a realização de uma modelagem 2D do problema, da seção transversal do piso, para simular a taxa de energia necessária para garantir o não congelamento do solo. Para isso, utilizou-se o software Energy 2D para a simulação da transferência de calor. Devido à menor assertividade do programa em transferência de calor por convecção, a modelagem proposta considera apenas a condução do calor e tenta se assemelhar o máximo possível a um cenário real.

## 2.1. CONDUÇÃO TRANSIENTE

Considerando-se a condição inicial na qual o centro de distribuição refrigerado está em sua temperatura de operação,  $-18^{\circ}\text{C}$ , e as camadas que formam a infraestrutura do piso e o solo encontram-se com temperatura inicial igual a  $20^{\circ}\text{C}$ . Verifica-se tratar de um problema de condução transiente, visto que a temperatura de cada ponto do sistema afetará os demais, em função do tempo, até que se alcance o regime estacionário.

Bergman et al (2014, p. 280) descreve: “Típicamente, tais problemas não estacionários ou transientes, surgem quando as condições de contorno de um sistema são mudadas. [...] As mudanças continuarão a ocorrer até que uma distribuição de temperaturas estacionária seja alcançada.”

## 2.2. EQUAÇÃO DA DIFUSÃO DO CALOR

O trabalho de Xie (2018) discretiza os cálculos por trás do software Energy 2D. A transferência de calor por condução é modelada a partir da equação da difusão de calor com geração, dada por:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k \nabla T] + \dot{q} \quad (1)$$

Em que  $T(x, y, z, t)$  é a distribuição de temperatura,  $\dot{q}(x, y, z, t)$  é a taxa de geração volumétrica de calor e  $k(x, y, z, t)$  é a condutividade.

## 2.3. MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS

A Equação (1) foi discretizada no espaço e no tempo pelo método de diferenças finitas no domínio do tempo, FDTD (*Finite-Difference Time-Domain method*) com o método implícito. Para conhecer a temperatura de um nó em um instante de tempo  $t + \Delta t$  no método implícito, deve-se conhecer a nova temperatura de todos os nós adjacentes no mesmo referido instante. Portanto, todos os nós devem ser resolvidos simultaneamente. Este método permite atingir uma melhor estabilidade numérica, além de não impor restrições em  $\Delta x$  e  $\Delta t$ . O domínio computacional do software é uma malha de  $100 \times 100$ , resultando em 10.000 pontos nodais. O Energy 2D não permite o ajuste da malha, ficando limitado a esta quantidade de nós.

Quanto maior for o valor do  $\Delta t$ , menor será o tempo de computação. Entretanto, como será mostrado na sequência deste trabalho, a escolha do  $\Delta t$  pode implicar em uma pequena diferença nos resultados, com  $\Delta t$  maiores podendo resultar em uma pequena perda de precisão.

### 3. CASO DE ESTUDO

A partir da análise da condução de calor em duas dimensões do problema, utilizou-se as ferramentas do Energy 2D para modelar o perfil da seção transversal do piso. Para isso, foi traçado o perfil térmico de cada componente do sistema, desde o interior da câmara frigorífica, passando pelas camadas de construção do piso, e finalmente ao solo local. O Energy 2D trata-se de uma ferramenta simples e gratuita. Possui uma interface fácil e intuitiva, possibilitando uma rápida curva de aprendizado.

Ao inserir um novo componente no sistema, o programa possibilita a edição de diversas informações como dados geométricos, ópticos, mecânicos, entre outros. O foco deste trabalho está nas abas que tratam da fonte do objeto e das características térmicas. Na Figura 5 é demonstrada a seção *Source* (ou fonte, em português) em que é possível definir em qual temperatura o objeto se encontra, se esta é constante, ou ainda se ele é uma fonte de potência, além de outras funcionalidades.

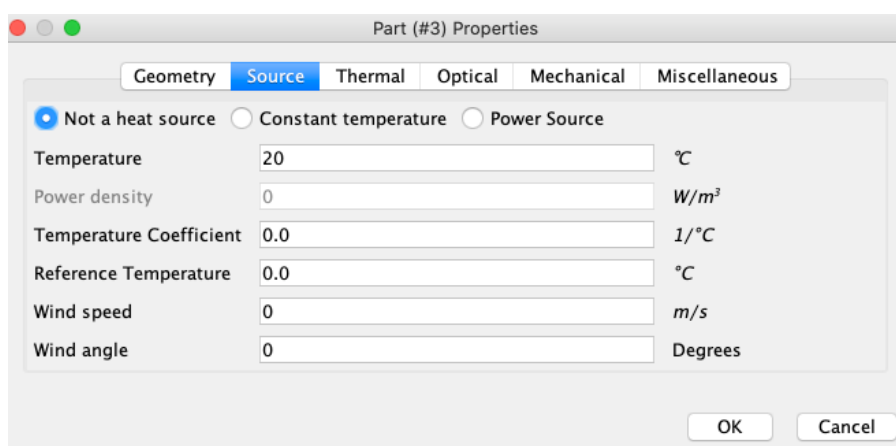


Figura 5 Itens editáveis na seção *Source* do programa Energy 2D.

A Figura 6 apresenta a seção *Thermal* (térmica). Aqui são inseridos os dados de entrada da condutividade térmica, calor específico e massa específica do componente do sistema.

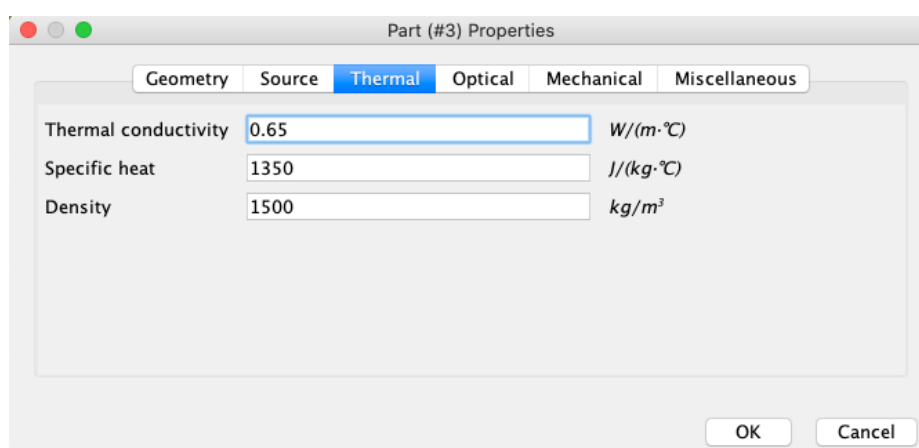


Figura 6 Itens editáveis na seção *Thermal* do programa Energy 2D.

#### 3.1. DESCRIÇÃO DA MODELAGEM DO SISTEMA

Este centro de distribuição refrigerado possui uma área na faixa dos 5.000 m<sup>2</sup>, com mais de 100 tubos distribuídos ao longo da edificação. Para a modelagem do problema, foi

considerado um recorte com 20 metros de extensão da região central da câmara fria, área mais crítica. O interior da câmara frigorífica foi tratado com temperatura constante a  $-18^{\circ}\text{C}$ , sua condição interna de operação.

A Figura 7 retrata o modelo final considerado da seção transversal do piso para a realização das simulações. Devido às restrições do software, os tubos foram tratados como cilindros sólidos, com uma taxa de geração volumétrica de calor. Verifica-se que foram posicionados, para coleta de dados, cinco sensores de temperatura e dois sensores de fluxo de calor. Cada sensor de temperatura foi posicionado ao centro entre dois tubos de aquecimento, no ponto médio das camadas de concreto superior, isolante, concreto inferior e sub-base granular. O último, e mais importante, foi posicionado assim que se inicia a camada que não deve congelar, o solo. Os sensores de fluxo de calor foram alocados entre a câmara e a camada superior de concreto e entre o solo e a sub-base granular.

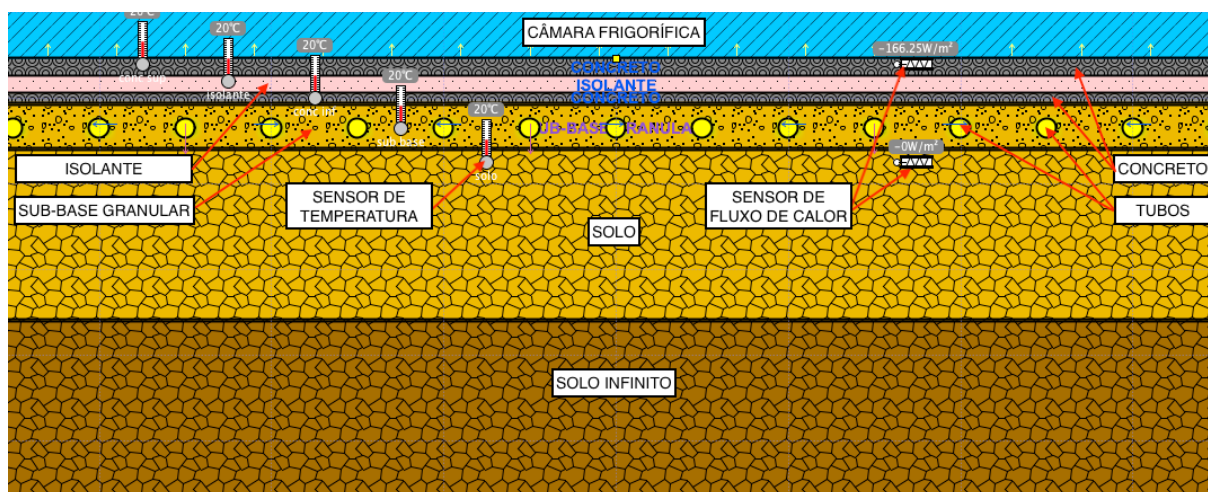


Figura 7 Modelagem da seção transversal do sistema de aquecimento de piso no software Energy 2D.

A camada denominada solo infinito refere-se a camada de solo suficientemente distante do sistema do centro de distribuição refrigerado para não ser afetada por este. Esta distância foi considerada como 3 metros de profundidade. Conforme indicado por Neto (2014), o solo em profundidades menores (de 3 a 5 metros) apresenta uma temperatura média variando entre  $18$  a  $21^{\circ}\text{C}$ . Para a realização deste trabalho foi considerado o solo infinito como uma fonte de temperatura constante a  $20^{\circ}\text{C}$ .

O Brasil é um país que possui uma diversidade enorme de tipos de terra, cada qual com suas peculiaridades e características. Portanto, faz-se importante uma análise das propriedades do local em que o centro de distribuição refrigerado está instalado. Em trabalho de título Atlas de Solos, realizado por Fischer et al. (2022), o programa Solo na Escola, da Universidade Federal do Paraná, mapeou as terras da região metropolitana de Curitiba. Analisando-se o trabalho, pode-se concluir que no local onde a câmara fria está instalada predomina o latossolo. Este tipo de terra geralmente é profundo, argiloso, apresenta boa drenagem, alta estabilidade e conseqüentemente boa capacidade de suportar construções.

Com base nos trabalhos de Oliveira (2017), Carvalho et al. (2013) e Prado (2005-2024), tornou-se possível estimar as propriedades térmicas e massa específica do latossolo. As propriedades do ar da câmara fria foram obtidas no software CoolPack (Technical University of Denmark, 1995). A Tabela 2 traz os dados coletados e utilizados como entrada para cada segmento do modelo.

Tabela 2 – Dados de entrada do modelo realizado no programa Energy 2D.

Material	Altura [m]	Fonte	$k$ [W/m°C]	$c_p$ [J/kg°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Referência
Ar da câmara fria	0,5	$T_{\text{constante}} -18^{\circ}\text{C}$	0,024	1014	1,261	TUD (1995)
Concreto	0,2 e 0,1	$T_{\text{inicial}} 20^{\circ}\text{C}$	1,75	1000	2200	NBR 15220-2 (2008)
Isolante (EPS)	0,2	$T_{\text{inicial}} 20^{\circ}\text{C}$	0,04	1420	20	NBR 15220-2 (2008)
Tubos (PEAD)	$\varnothing 0,2$	$Q_{\text{constante}} \dot{q} \text{ W/m}^3$	0,44	1800	960	NBR 15220-2 (2008)
Sub-base granular	0,5	$T_{\text{inicial}} 20^{\circ}\text{C}$	0,7	800	1250	NBR 15220-2 (2008)
Solo	2,0	$T_{\text{inicial}} 20^{\circ}\text{C}$	0,65	1350	1500	Conforme informado no texto
Solo infinito	5,0	$T_{\text{constante}} 20^{\circ}\text{C}$	0,65	1350	1500	Conforme informado no texto

O valor da taxa de geração de calor volumétrica nos tubos, identificado como  $\dot{q}$  na Tabela 2, foi variado para estabelecer uma relação de comparação entre as simulações. Inicialmente, utilizou-se uma taxa de geração de calor nula, 0 W/m<sup>3</sup>. Em sequência, foram aplicadas as taxas de 10, 50, 100 e 150 W/m<sup>3</sup>, escolhidas arbitrariamente, para visualizar se ocorre o congelamento do solo.

### 3.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Definiu-se as condições de contorno para o sistema de aquecimento de piso nas fronteiras horizontais pela condição de contorno de Neumann, com a derivada igual a 0°C/m, isolando o sistema nas laterais. Já para a fronteira superior e inferior, considerou-se o ar da câmara fria, com temperatura constante de -18°C, e o solo infinito, com temperatura de 20°C, respectivamente.

## 4. RESULTADOS

Esta seção divide-se em duas subseções. Na primeira, é tratado a influência do passo de tempo na precisão dos resultados do método de elementos finitos. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas no modelo criado.

### 4.1. TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE PASSO DE TEMPO

Como citado ao longo do trabalho, o software Energy 2D utiliza o método implícito de elementos finitos para resolver as equações do programa. Ao possibilitar o uso de  $\Delta t$  maiores, esse método permite que o tempo de computação seja muito menor. Porém, os resultados podem perder a precisão conforme o tempo de computação diminui. Para fins comparativos, o modelo foi simulado variando os valores do passo de tempo em 1, 2,5, 5, 10 e 20 segundos, mantendo a taxa de geração volumétrica constante. Foi escolhida arbitrariamente a taxa de

100 W/m<sup>3</sup> para a realização da comparação de resultados. A Tabela 3 retrata a relação entre os resultados obtidos no sensor de temperatura posicionado no solo ao fim da simulação e a variação do  $\Delta t$ .

Tabela 3 – Comparação de resultados para diferentes passos de tempo.

$\Delta t$ [s]	Tempo computacional	T <sub>solo</sub> após 90 dias [°C]
1	~2 h	1,61
2,5	~1 h	-0,01
5	~26 min	-0,20
10	~13 min	-0,25
20	~6 min	-0,26

A diferença de temperatura após os 90 dias simulados chega a 1,87°C entre o maior e o menor passo de tempo. Percebe-se que os resultados apresentam uma diferença maior apenas no primeiro salto de passo de tempo testado. Enquanto que, de 5s para 20s a diferença nos resultados é mínima.

O trabalho de Xie (2012) afirma que, com um passo de tempo de 0,01 segundo, o Energy 2D é capaz de manter o nível de precisão na condução do calor em 99,9% independente da duração da simulação e da complexidade das estruturas contidas no sistema. Devido às características do sistema de aquecimento de piso de câmaras frias, é necessário simular o sistema por alguns meses com o objetivo de obter o regime permanente. Seguindo um padrão linear de acréscimo de tempo computacional, é estimado que a simulação de 90 dias com um passo de tempo de 0,01s dure em torno de 200 horas, tornando-a inviável nas condições de desenvolvimento deste trabalho. Contudo, é possível perceber que a perda de precisão não é grande, fazendo-se possível encontrar valores condizentes com tempos de aquisição razoáveis. Para o restante dos resultados foi utilizado o passo de tempo de 1s, com o tempo de aquisição para cada simulação um pouco superior a 2 horas.

#### 4.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO

As simulações foram realizadas buscando uma condição semelhante à de regime permanente. Com esse objetivo, todos os cenários foram simulados por 90 dias. Após esse período, os dados coletados pelos termômetros estavam alterando na casa do milésimo de °C por dia. Portanto, fixou-se esse prazo como padrão para as simulações já que atinge estado suficientemente próximo ao regime constante. A Figura 8 apresenta o gráfico obtido a partir dos dados exportados dos sensores de temperatura do Energy 2D para a simulação utilizando a taxa de geração volumétrica de calor nula. Os gráficos para as demais taxas se encontram no Apêndice A deste trabalho. A Figura 9 retrata a comparação entre os sensores posicionados no solo para cada taxa de geração de calor.



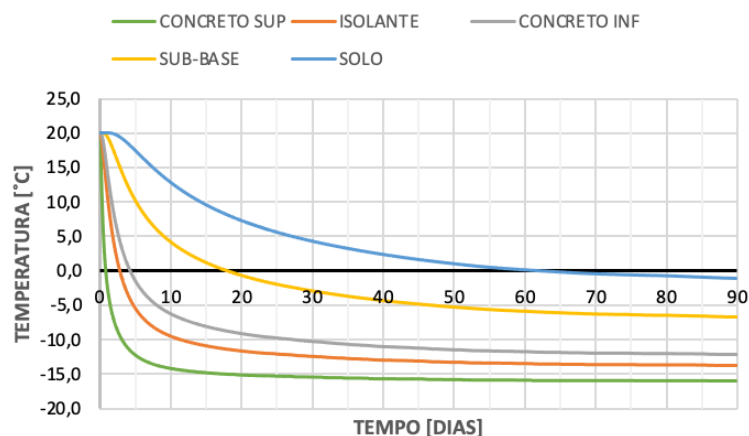


Figura 8 Variação da temperatura em função do tempo para cada camada do sistema, utilizando a taxa de geração volumétrica de calor nula, igual a  $0 \text{ W/m}^3$ .

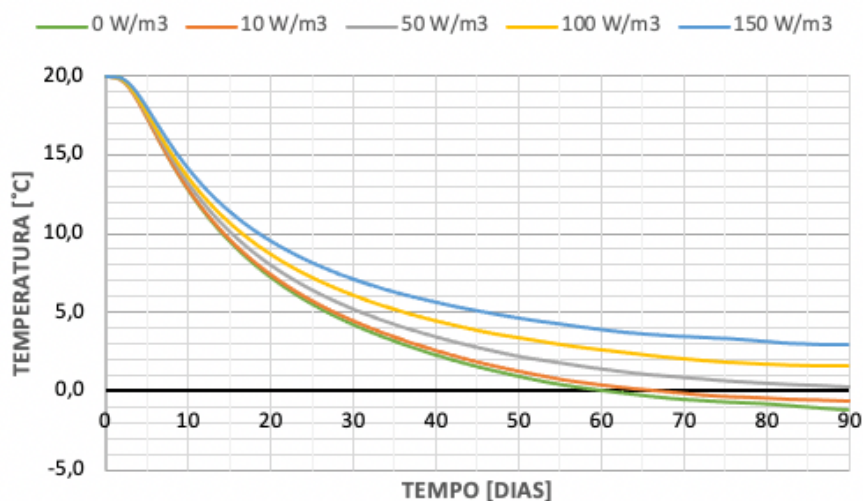


Figura 9 Comparação entre os sensores de temperatura posicionados no solo para cada taxa de geração volumétrica de calor.

Percebe-se que a partir de uma taxa de geração volumétrica de calor na faixa de  $50 \text{ W/m}^3$  em cada cilindro, passamos a obter valores positivos no termômetro alocado junto ao solo. A Tabela 4 apresenta os resultados auferidos ao fim da simulação. Importante ressaltar que os dados abaixo foram obtidos utilizando um  $\Delta t$  igual a 1s para o método de diferenças finitas no domínio do tempo.

Tabela 4 – Dados de saída dos sensores de temperatura no software Energy 2D.

Taxa [ $\text{W/m}^3$ ]	Temperatura após 90 dias [ $^{\circ}\text{C}$ ]				
	Concreto Superior	Isolante	Concreto Inferior	Sub-base	Solo
0	-16,0	-13,7	-12,1	-6,6	-1,1
10	-16,0	-13,6	-11,9	-6,3	-0,7
50	-15,8	-13,2	-11,3	-5,3	0,2
100	-15,6	-12,6	-10,5	-3,9	1,6
150	-15,3	-12,0	-9,7	-2,6	2,9

A fim de se aproximar da situação real, foi calculado o fluxo de calor  $q''$  equivalente para a área da superfície do tubo ao se multiplicar a taxa pela relação entre o volume e a área da superfície externa do cilindro, retratada na Equação (2).

$$\dot{q} V = q'' A \quad (2)$$

O calor gerado dentro do cilindro é o mesmo que deve passar pela superfície. Dessa forma, para os cilindros de raio 0,1 metro e considerando  $\dot{q}$  igual a 50, 100 e 150  $W/m^3$ , obteve-se um fluxo de calor na superfície do tubo igual a 2,5, 5,0 e 7,5  $W/m^2$ , respectivamente. Esses valores representam o calor por convecção transferido pelo ar ao passar por cada tubo.

Em relatório técnico realizado após a verificação de falha no sistema de aquecimento do piso do centro de distribuição refrigerado, foi constatado que cada metro linear de tubo deveria prover, pelo menos, 3,2 W de calor para prevenir o congelamento. Os resultados obtidos na simulação estão na mesma ordem de grandeza dos cálculos do relatório, conforme retratado na Tabela 5. Isso demonstra que a utilização de um programa computacional simples como o Energy 2D pode auxiliar o engenheiro em problemas do seu cotidiano com a validação de resultados.

Tabela 5 – Comparação de resultados obtidos pela simulação com relatório técnico.

	Conforme Relatório	$\dot{q}=50$ [W/m <sup>3</sup> ]	$\dot{q}=100$ [W/m <sup>3</sup> ]	$\dot{q}=150$ [W/m <sup>3</sup> ]
Calor [W/m]	3,2	1,57	3,14	4,71

Os sensores de fluxo de calor do modelo foram posicionados de forma a mensurar o fluxo de calor nos limites superior e inferior da infraestrutura do piso, ou seja, entre a câmara fria e a camada superior de concreto e entre o solo e a sub-base granular. A Tabela 6 apresenta os dados coletados após 90 dias de simulação, próximo ao regime constante do sistema.

Tabela 6 – Dados de saída dos sensores de fluxo de calor do software Energy 2D.

Taxa [W/m <sup>3</sup> ]	Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]	
	Concreto / Câmara fria	Solo / Sub-base
0	-17,20	-9,12
10	-17,50	-9,30
50	-18,87	-9,06
100	-21,25	-8,77
150	-23,54	-8,41

Os dados estão negativos devido à condução de sentido no eixo y do software. Considerando que com taxas de geração volumétrica de calor abaixo de 50  $W/m^3$  ocorre o congelamento do solo, o fluxo de calor no plano da câmara fria deve estar em pelo menos 19  $W/m^2$ , em módulo.

## 5. CONCLUSÃO

Os sistemas de aquecimento de piso podem demorar meses para apresentar um indício de problema e, quando passam a ocorrer, pode ser tarde demais para uma solução rápida e que não acarrete em grandes prejuízos. Portanto, é importante não negligenciar esta parte do projeto e a posterior manutenção do sistema.

Os resultados obtidos demonstram que, mesmo com uma abordagem simplificada do problema real, foi possível chegar a valores condizentes. O Energy 2D se mostrou uma ferramenta com potencial de ser extremamente útil, podendo solucionar problemas de engenharia de forma simples e gerar embasamento para o engenheiro na hora de realizar o seu projeto. Nas condições estabelecidas, foi possível concluir que a partir da taxa de geração volumétrica de calor de  $50\text{W}/\text{m}^3$ , ou  $1,57\text{W}$  para cada metro linear de tubo, o sistema manteve-se com temperaturas positivas ao atingir regime constante.

Sistemas de aquecimento de piso por ventilação natural, mesmo que baratos, devem ser escolhidos em condições muito específicas. Não só as características do estabelecimento, mas também as condições térmicas da cidade em que a empresa estará localizada podem acarretar no funcionamento, ou não, do sistema proposto. Para o prosseguimento do trabalho, seria interessante uma análise climática da cidade de Curitiba para avaliar mais a fundo as causas da falha e, também, avaliar as condições térmicas do ar para que se atinja a transferência de calor necessária dentro do tubo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações - ABNT NBR 15220-2 2005**, 2008.

ASHRAE. Refrigerated-facility design. *In*: AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Refrigeration: Handbook**. [S. l.: s. n.], 2019. v. SI Edition, cap. 23.

BERGMAN, Theodore L. *et al.* Condução transiente. *In*: BERGMAN, Theodore L. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. [S. l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014. cap. 5, p. 280-376.

CARVALHO, Paulo P. *et al.* Revista brasileira de meteorologia. **Observações e estimativas de propriedades térmicas do solo sob floresta e pastagem no leste da Amazônia**, [s. l.], 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300009>> Acesso em: 9 jan. 2024.

FISCHER, Bruno G. *et al.* **Atlas de solos**: Região metropolitana de Curitiba. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2022. 1 atlas. Disponível em: [https://issuu.com/solonaescola/docs/atlas\\_solos\\_rmc](https://issuu.com/solonaescola/docs/atlas_solos_rmc). Acesso em: 16 dez. 2023.

NETO, Alberto H. Poli/USP pesquisa sistema alternativo de ar condicionado. *In*: ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Formando engenheiros e líderes: Notícias**. [S. l.], 2014. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1703-poliusp-pesquisa-sistema-alternativo-de-ar-condicionado.html#:~:text=?O%20solo%20em%20profundidades%20menores,%2C%20em%20média?%2C%20explica>> Acesso em: 6 jan. 2024.

OLIVEIRA, Aureo S. Temperatura de Superfícies Naturais. *In*: NÚCLEO DE ENGENHARIA DE ÁGUA E SOLO. **Fundamentos de meteorologia e climatologia**. [S. l.]: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017. cap. VII. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjioJ7W-YGEAxUPpZUCHXuTBFcQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ufrb.edu.br%2Fneas%2Fdocumento%2Fcategory%2F8-cca-035-meteorologia-e-climatologia-agricola%3Fdownload%3D43%3Acap-7-soiltemp&usq=AOvVaw3yDng8cfMGrvV6LVvN\\_M1E&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjioJ7W-YGEAxUPpZUCHXuTBFcQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ufrb.edu.br%2Fneas%2Fdocumento%2Fcategory%2F8-cca-035-meteorologia-e-climatologia-agricola%3Fdownload%3D43%3Acap-7-soiltemp&usq=AOvVaw3yDng8cfMGrvV6LVvN_M1E&opi=89978449)> Acesso em: 7 jan. 2024.

PRADO, Hélio. Densidade do solo, porosidade e água disponível. *In*: PRADO, Hélio; CARVALHO, João P. **Pedologia fácil**. [S. l.]: Hélio do Prado, 2005 2024. Disponível em: <<https://www.pedologiafacil.com.br/enquetes/enq22.php#:~:text=Latossolos%20de%20textura%20argilosa%20ou,35%20g.cm%2D3%20>> Acesso em: 9 jan. 2024.

SANFORD, Douglas; RAHN, Keith A. Cold storage frost heave prevention. **Proceedings of the Creative Construction e-Conference**, [s. l.], n. 012, 2022.. Disponível em: <https://doi.org/10.3311/CCC2022-012>

TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK (TUD). Refrigeration utilities. *In*: TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK. **CoolPack**. 1.50. [S. l.]: Department of Mechanical Engineering, 1995. Disponível em: <<https://www.ipu.dk/products/coolpack/>> Acesso em: 10 jan. 2024.

THE CONSTRUCTOR. Frost heave: How it works, effects, and prevention. *In*: THE CONSTRUCTOR. **Building ideas**: How to guide. [S. l.]: The Constructor, 2021. Disponível em: <<https://theconstructor.org/practical-guide/frost-heave-effects-prevention/29754/>> Acesso em: 18 jan. 2024.

XIE, Charles. Interactive heat transfer simulations for everyone. **The Physics Teacher**, American Association of Physics Teachers, v. 50, ed. 4, p. 237-240, 2012. Disponível em: <<http://energy.concord.org/energy2d/index.html>> Acesso em: 28 out. 2023.

XIE, Charles. Simulating thermal conduction. *In*: MEDIUM. **Numerical algorithms for simulating three modes of heat transfer**. [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://charlesxie.medium.com/numerical-algorithms-for-simulating-three-modes-of-heat-transfer-e65fca9baf50>> Acesso em: 14 jan. 2024.

## APÊNDICE A – CURVAS DE TEMPERATURA PARA DEMAIS TAXAS DE CALOR SIMULADAS

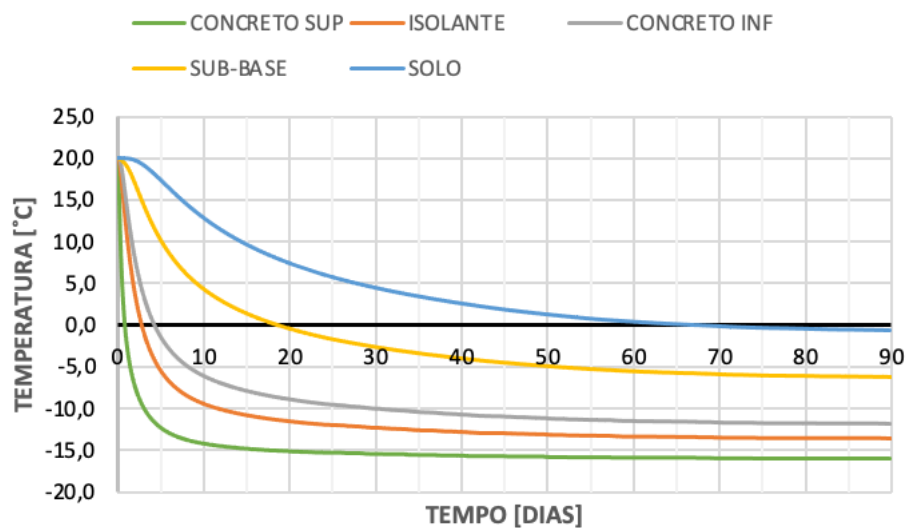


Figura A1 Variação da temperatura em função do tempo para cada camada do sistema, utilizando a taxa de geração volumétrica de calor igual a 10 W/m³.

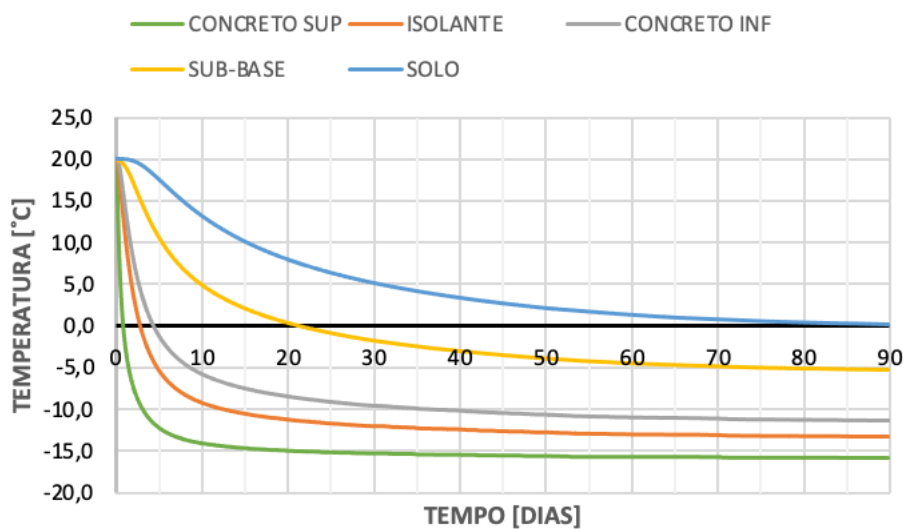


Figura A2 Variação da temperatura em função do tempo para cada camada do sistema, utilizando a taxa de geração volumétrica de calor igual a 50 W/m³.

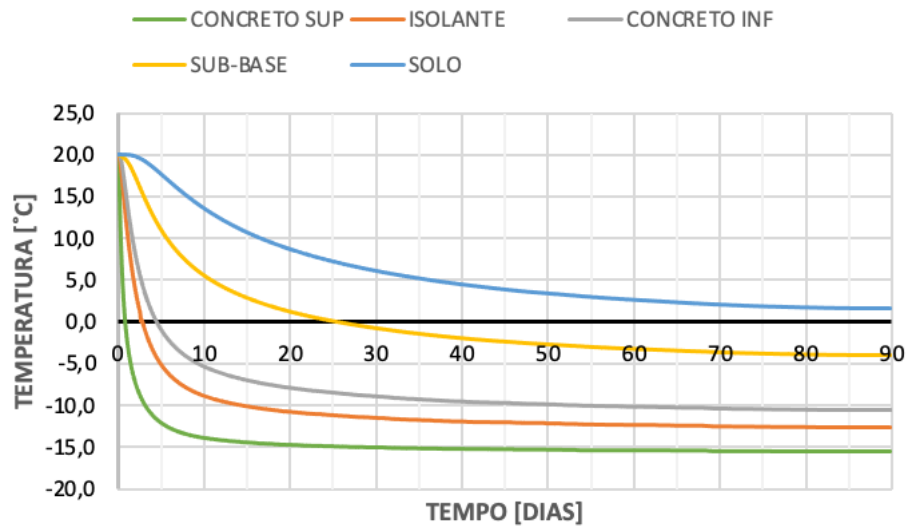


Figura A3 Variação da temperatura em função do tempo para cada camada do sistema, utilizando a taxa de geração volumétrica de calor igual a  $100 \text{ W/m}^3$ .

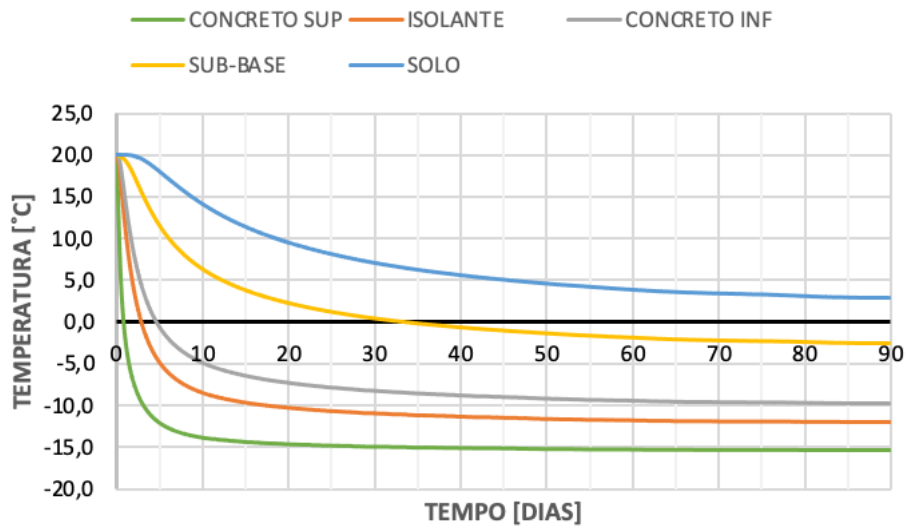


Figura A4 Variação da temperatura em função do tempo para cada camada do sistema, utilizando a taxa de geração volumétrica de calor igual a  $150 \text{ W/m}^3$ .