

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

LUCAS BARROS DALLAMICO

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CURA DO CIMENTO USANDO PT100

Joinville
2023

LUCAS BARROS DALLAMICO

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CURA DO CIMENTO USANDO PT100

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville
2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me apoiaram em toda a minha trajetória e sempre me incentivaram a seguir o caminho da ciência.

Ao Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler, pela tutoria, compreensão e acompanhar meus passos dentro da universidade.

Aos meus amigos e companheiros de curso que permaneceram unidos na jornada rumo à graduação.

À equipe de competição BOTCEM por me proporcionar um ambiente de muito aprendizado e oportunidades para sair da zona de conforto.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por todas as oportunidades oferecidas.

RESUMO

Sistemas e aplicações que reduzem custo são prioridade na indústria devido à severa inflação global e crise de insumos. Nessa ótica, um maciço investimento em tecnologias de monitoramento em tempo real configura-se como saídas para mitigar gastos e aprimorar técnicas. Tais fatores impactam diretamente no valor ao final do produto. A proposta desse trabalho é aplicar o dispositivo desenvolvido na dissertação de Paula Lima (2021) para monitorar o processo de cura do cimento, por meio do fluxo de calor proveniente das reações químicas exotérmicas após a hidratação da mistura. A técnica embarcada no dispositivo é o método do fio quente que mede a variação da resistência por meio de um PT100 acoplado na amostra. Os dados coletados foram comparados com o gráfico teórico para tentar estabelecer uma relação e estimar a cura. Com o auxílio de um sensor capacitivo comercial para medir a umidade do solo, é registrado a variação da capacitância na amostra para contrastar com os resultados obtidos. Por meio do resultado espera-se reduzir o uso de materiais em construções e viabilizar um monitoramento sem usar blocos de controle para aferir a umidade interna, com ganho de espaço e redução do desperdício de matérias.

Palavras-chave: Sensor resistivo. Sensor capacitivo. Coleta de dados.

ABSTRACT

Systems and applications that reduce costs are a priority in the industry due to severe global inflation and input crisis. In this perspective, a massive investment in real-time monitoring technologies is seen as a way to mitigate expenses and improve techniques. These factors directly impact the final product value. The purpose of this work is to apply the device developed in Paula Lima's dissertation (2021) to monitor the curing process of cement through the heat flow resulting from exothermic chemical reactions after the hydration of the mixture. The technique embedded in the device is the hot wire method, which measures resistance variation through a PT100 attached to the sample. The collected data were compared to the theoretical graph in an attempt to establish a relationship and estimate the curing process. With the aid of a commercial capacitive sensor to measure soil moisture, the variation in capacitance in the sample is recorded to contrast with the obtained results. The outcome is expected to reduce the use of materials in constructions and enable monitoring without the need for control blocks to measure internal moisture, thereby saving space and reducing material waste.

Keywords: Resistive sensor. Capacitive sensor. Data collect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistência em volta de um termistor.	12
Figura 2 – Curva R-T de RTDs e um termistor.	13
Figura 3 – Sensor capacitivo ideal.	14
Figura 4 – Gráfico teórico da liberação de calor durante a hidratação do cimento Portland.	15
Figura 5 – Vista superior da placa com circuito resistivo.	17
Figura 6 – Vista inferior da placa com circuito resistivo.	17
Figura 7 – Diagrama simplificado da malha de corrente	18
Figura 8 – Diagrama do envio dos dados do PT100 até o computador	18
Figura 9 – Placa do sensor capacitivo.	19
Figura 10 – Circuito do sensor capacitivo	19
Figura 11 – Experimento montado	20
Figura 12 – Diagrama do experimento	21
Figura 13 – Dados tratados do PT100 a cada hora.	23
Figura 14 – Dados tratados do sensor capacitivo a cada hora.	24
Figura 15 – Separação em estágio do gráfico do PT100.	25
Figura 16 – Separação em estágio do gráfico do sensor capacitivo.	25

LISTA DE SIGLAS

<i>I₂C</i>	Inter-Integrated Circuit
CC	Corrente Continua
CI	Circuito Integrado
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
LHS	<i>Line Heat Source</i>
NTC	<i>Negative Temperature coefficient</i>
PID	Proportional Integral Derivative
PTC	<i>Positive Temperature coefficient</i>
RTD	<i>Resistance temperature detector</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo	9
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos Específicos	10
2	REVISÃO TEÓRICA	11
2.1	Transferência de calor	11
2.2	Método para obter a transferência de calor	11
2.3	Sensor resistivo	12
2.4	Sensor capacitivo	13
2.5	O processo de cura de cimento	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Dispositivo com o PT100	16
3.2	Módulo de umidade do solo	19
3.3	Montagem do experimento	20
3.4	Tratamento dos dados brutos do cimento	22
4	RESULTADOS	23
5	CONCLUSÕES	26
	REFERÊNCIAS	27
	APÊNDICE A	28

1 INTRODUÇÃO

O interesse por sistemas de monitoramento na área da engenharia se deve à enorme quantidade de aplicações, seja para monitorar a qualidade do ar até a vazão de um leito de rio. Os dados gerados podem ser usados para sistemas de controle até a prevenção de acidentes naturais, como exemplo está uma aplicação para realizar o monitoramento de rio que notifica autoridades sobre possíveis enchentes as margens do rio Itajaí-Açu no vale do Itajaí (JUNIOR; JOSE, 2013).

Esses dispositivos geralmente são submetidos à ambientes afastados ou extremos como florestas, em que não existe recurso externo para suprir energeticamente. Então devem ser eficientes com baixo consumo de energia ou possuir sistema de geração elétrica própria, como exemplo o uso de painéis solares (JUNIOR; JOSE, 2013). Assim permitirá a operação permaneça sem intervenção humana por longos períodos, para florestas a manutenção preventiva é a limpeza dos sensores e remoção de entulhos próximos à estrutura (JUNIOR; JOSE, 2013).

Partido do princípio que construções e campos de obra apresentam condições semelhantes, pode-se trazer esses sistemas com os mesmos requisitos para monitorar parâmetros na construção civil, com destaque para o processo de cura do cimento. A cura é responsável por fornecer as características de dureza e resistência a uma estrutura por meio de transformações químicas após a adição de água (HASTENPFLUG; VIECILI, 2017). As reações geradas são exotérmicas, que liberam calor para o ambiente, decorrente da reação dos compostos com a água, a duração do processo depende do esforço projetado ao corpo (HENN; KAILER, 2021).

Para que a cura esteja de acordo com a NBR 14931 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), a umidade interna deve ser mantida acima de 90% durante todo o processo. Manter este parâmetro durante o período garante que a viga irá suportar a carga axial projetada, sem apresentar avarias, como trinca, acarretando em danos estruturais condenando a construção montada encima (ABNT, 2004). Os impactos vão desde acidentes fatais até desastres ambientais, tal como vazamento de elementos químicos nocivos ou enchente devido o rompimento de barragem (HENN; KAILER, 2021).

Em decorrência dessas preocupações existem procedimentos definidos na NBR14931 para monitorar o processo através de blocos de controle, que simula em uma escala reduzida uma estrutura de cimento, a quantidade de amostras depende da força axial que deseja ser alcançada (ABNT, 2004). A umidade interna é aferida com sensores capacitivos ou resistivos em formato de vareta, todavia em ambos os casos é necessário destruir o corpo de prova resultando em resíduos da obra.

Durante o processo de cura, o calor gerado é medido para acompanhar a evolução da cura, entre as etapas presentes no processo está a pega. No artigo de Hastenpflug (2017) é apresentada uma técnica para estimar o tempo de pega de uma amostra usando a calorimetria semi-adiabática do cimento tipo Portland, proveniente das reações químicas que ocorrem no cimento enquanto está hidratado. A liberação de calor oscila conforme avança no tempo, a variação da temperatura interna pode ser medida com sensor resistivo.

Para registrar a diferença de temperatura em sua tese, Lima (2021) propôs um dispositivo de baixo custo para realizar a aferição da condutividade térmica usando o PT100. Em que consiste no aquecimento e resfriamento do sensor aplicando a técnica de controle *Proportional Integral Derivative* (PID), quanto maior a perda de calor durante o resfriamento menor a transferência de calor, em consequência menor a resistência (LIMA, 2021). O sensor resistivo PT100 usado no trabalho possui uma variação linear da resistência permitindo fazer uma relação com a temperatura.

A linearidade intrínseca e o encapsulamento metálico do sensor conferem-lhe propriedades que o tornam adequado para a utilização em substâncias sem oxidar, a exemplo do cimento. Então é aplicável para medir o fluxo de calor que ocorre dentro de amostra. O *hardware* por trás do PT100 coleta as informação e transmite via Bluetooth para outro dispositivo compatível para visualização dos gráficos.

O artigo de Li e Mingchen (2019) propõem a aplicar o sensores capacitivos para estimar a umidade interna de uma viga de concreto, acoplando três placas ao redor do corpo, sendo o concreto o dielétrico entre as placas capacitivas. A variação da quantidade de água altera a capacitância, quanto maior a umidade interna menor a capacitância sob os terminais (LI et al., 2019). O sensor comercial de umidade de solo usa-se dos mesmo conhecimento para fazer a estimativa no solo, todavia apresentando uma sensibilidade menor e com apenas dois terminais (BRAMPTON, 2022).

A proposta desse trabalho é observar o fluxo de calor das reações do cimento como descrito no artigo de Hastenpflug (2017) por meio do *hardware* usado na dissertação de mestrado de Lima (2021), que optou por usar o PT100 como sensor resistivo. O sensor capacitivo registrará a variação da capacitância, a fim de investigar se há um decréscimo quando ocorre a redução da umidade no corpo em análise.

1.1 OBJETIVO

Para resolver a problemática do monitoramento da cura do cimento com as tecnologias e artigos citados, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar o dispositivo de baixo consumo desenvolvido por Lima (2021) em amostras de cimento para obter as curvas de transferência de calor e monitorar a cura usando o sensor resistivo PT100.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento de sensores resistivos para obter a curva de variação de resistência.
- Compreender o funcionamento de sensores capacitivos para obter a curva de variação da capacitância.
- Tratar os dados recebidos pelo dispositivo.
- Analisar os dados gerados e comparar com a teoria se estão de acordo com o esperado.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De acordo com Resnick (2012) existem três meios de transmissão de calor: condução, radiação e convecção. Para a condução os elétrons vibram de maneira a se chocarem uns com os outros, esse efeito é propagado para toda a estrutura do corpo seguindo da face mais quente para mais fria. Considerando a área A e espessura L de duas faces iguais mantidas com uma temperatura T_Q e T_F , Q referindo a energia transferida na forma de calor entre placas sob um intervalo de tempo t resulta na Equação 1 (RESNICK, 2012). Cada material possui uma condutividade térmica k independente do formato.

$$P_{cond} = \frac{Q}{t} = k \cdot A \cdot \frac{T_Q - T_F}{L} \quad (1)$$

A primeira lei da termodinâmica descreve a energia interna de um sistema em razão do trabalho e fluxo na Equação 2 (RESNICK, 2012). Para manter a igualdade, sempre que houver alteração no sistema ocorrerá uma compensação, resultando em trabalho ou temperatura (RESNICK, 2012). A capacidade térmica C de um corpo transmitir energia é descrito como uma relação de proporcionalidade entre a transferência de calor e variação de temperatura conforme Equação 3 (RESNICK, 2012). O tipo do material não limitará a troca de calor, apenas a diferença de temperatura inicial e final (RESNICK, 2012).

$$\Delta E_{int} = Q - W \quad (2)$$

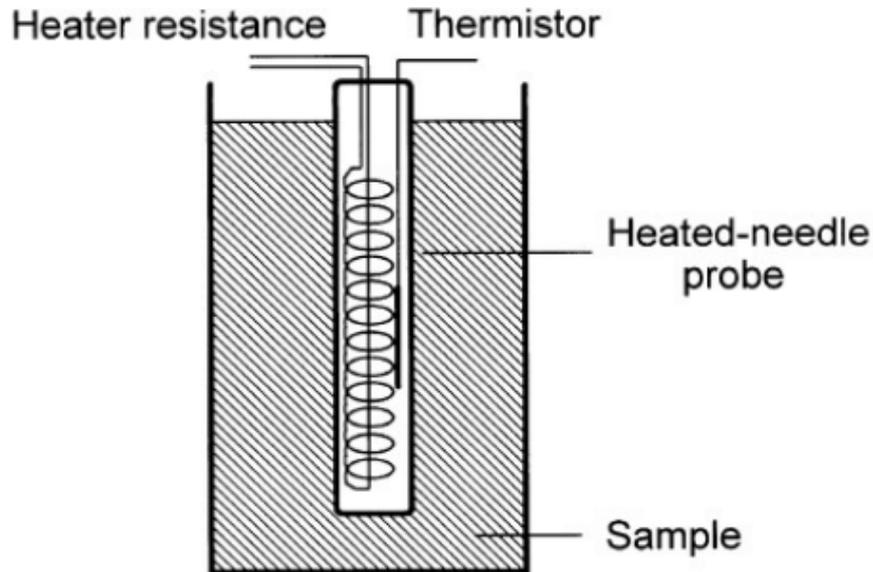
$$Q = C\Delta T = C(T_f - T_i) \quad (3)$$

2.2 MÉTODO PARA OBTENÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O método *Line Heat Source* (LHS) ou método do fio quente consiste em uma fonte de calor linear e um termistor em formato de agulha no mesmo corpo, mostrado na Figura 1 (LIMA, 2021). A determinação provém do gradiente de temperatura aplicado na estrutura, que pode ser expresso de acordo com Equação 4, fazendo alusão à fórmula da tensão e proveniente da Equação 3 sendo U condutância do corpo (LIMA, 2021).

$$U = \frac{Q}{\Delta T} \quad (4)$$

Figura 1 – Resistência em volta de um termistor.



Fonte: (LIMA, 2021) apud (WEBSTER, 1999).

Considerando uma fonte de calor proveniente de uma potência constante ao longo do tempo, um fio longo fino cujo comprimento maior que $30r$ e analisando em regime permanente chega-se na Equação 5 (HEALY; KESTIN, 1976). Onde C a constante de aquecimento na área de contato tanto a potência distribuída no comprimento l , e a constante de Euler. Para termistores lineares a resposta a variação de temperatura comporta-se semelhante a equação da reta, então a condutividade térmica é simplificada a Equação 6 sendo x o intervalo linear da resistência (LIMA, 2021). Existe variação do método mudando a topologia do sensor e aumentando a quantidade de sensores ou termistores.

$$\Delta T = \left[\frac{C}{4\pi k} \ln \left(\frac{4e}{r^2 \ln(\lambda)} \right) \right] + \frac{C}{4\pi \lambda} \ln(t) \quad (5)$$

$$k = \frac{Q}{4\pi x} \quad (6)$$

2.3 SENSOR RESISTIVO

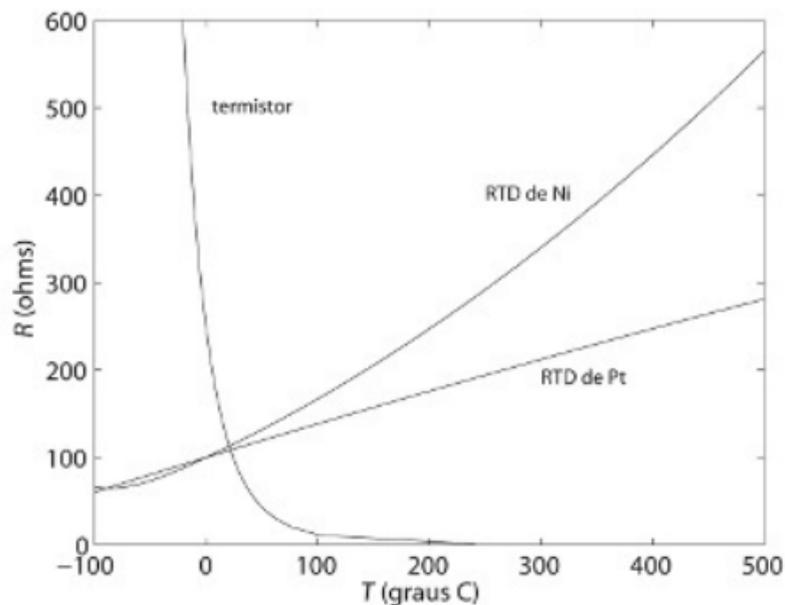
O sensor resistivo é o dispositivo que varia a resistência de acordo com a grandeza mensurada, fabricado a partir de metais, também chamados de *Resistance temperature detector* (RTD) ou semicondutores conhecidos como termistores (AGUIRRE, 2013). A variação da resistência dos RTD não é linear para todas as faixas de temperatura, decorrente do comportamento é limitado a uma faixa de temperatura para que seja válido o coeficiente angular da reta (AGUIRRE, 2013).

A resistividade do material ρ é definida na Equação 7 sendo ρ_0 a resistência em temperatura ambiente com a T_0 , α o coeficiente angular da reta (AGUIRRE, 2013).

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\Omega m) \quad (7)$$

Há duas classificações para o comportamento dos sensores, os *Positive Temperature coefficient* (PTC) quando sobe a temperatura aumenta a resistência elétrica e os *Negative Temperature coefficient* (NTC) a resistência diminui com elevação da temperatura (AGUIRRE, 2013). Um exemplo de PTC é a platina com uma região linear de [0°C,630°C] conforme a Figura 2, sendo o material base do PT100 fornecendo-lhe especificação de resistência próximo de 100Ω em zero graus (AGUIRRE, 2013).

Figura 2 – Curva R-T de RTDs e um termistor.



Fonte: (AGUIRRE, 2013).

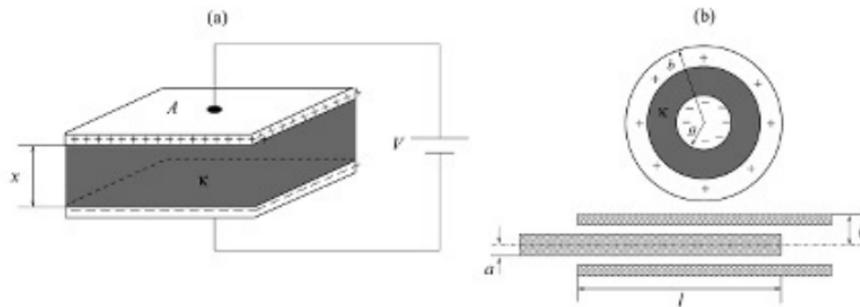
2.4 SENSOR CAPACITIVO

O funcionamento do sensor capacitivo consiste em duas placas paralelas metálicas separadas por um material dielétrico que acumula um potencial elétrico nos terminais (AGUIRRE, 2013). A capacitância F em Faraday é apresentado na Equação 8 onde C é coulomb de carga elétrica, q é $6,28 \times 10^{18}$ elétrons para um volt (AGUIRRE, 2013). O acúmulo de carga nas extremidades varia em relação a área entre as placas e a distância entre as mesmas no material, a relação é descrita na Equação 9 e demonstrado na Figura 3 (AGUIRRE, 2013).

$$C(t) = \frac{q}{V} \quad (8)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln b/a} \quad (9)$$

Figura 3 – Sensor capacitivo ideal.



Fonte: Citado por (AGUIRRE, 2013).

2.5 O PROCESSO DE CURA DE CIMENTO

O processo de cura de uma viga de cimento consiste em retardar a evaporação da água presente em seu interior, para que as reações químicas ocorram (HENN; KAILER, 2021). Mantendo a água de amassamento, água usada para preparar o cimento aprisionada no interior evitando a retração e o deslocamento de substâncias que pode interferir na hidratação, ligado a resistência do cimento (HENN; KAILER, 2021). De acordo com a NBR 14931 (ABNT, 2004) o tempo de cura empregado depende da força axial ao qual foi projetado. Para retardar a evaporação, é aplicado pelo menos uma intervenção podendo ser químicas, com impermeabilizantes, ou física construindo contenções de madeira em volta da estrutura (ABNT, 2004).

Durante o processo de cura ocorre o período de pega do cimento, que é definido:

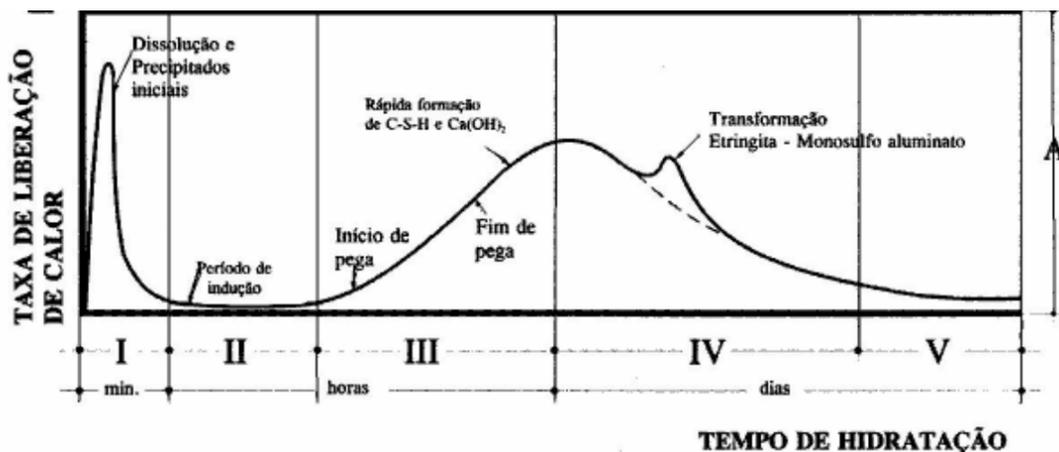
Segundo Neville (2013) [5], o termo pega é utilizado para descrever o período de início do enrijecimento da pasta de cimento, [...]. Posteriormente ao enrijecimento ocorre um aumento brusco de temperatura, neste momento a pasta de cimento solidifica e se torna não mais trabalhável, podendo ser chamada de início de pega (MEHTA et al., 1994 [3]). Já o final da pega ocorre quando a pasta de cimento passa a não mais sofrer deformações e se solidifica por completo (MEHTA et al., 1994 [3], PETRUCCI, 1998v [6]) (HASTENPFLUG; VIECILI, 2017, p. 4).

De acordo com Hastenpflug (2017) os tempos de início e fim da pega dependem da concentração de C_3A e C_3S que variam de acordo com a fabricante do cimento. A reação química dos elementos em contato com a água é exotérmica em que

há liberação de calor para o ambiente em joules por grama de cimento anidro (HASTENPFLUG; VIECILI, 2017) apud (NETVILLE, 2013). A curva teórica apresentada na Figura 4 demonstra os cinco estágios da variação do fluxo de calor durante o processo de hidratação do cimento.

O estágio I no logo após a hidratação os íons liberam calor nos primeiros minutos, o estágio II o período de indução as reações são lentas e formam $C - S - H$ ((HASTENPFLUG; VIECILI, 2017) apud Vernet 2013). No estágio III é caracterizado pelo início da pega por conta do crescente aumento do fluxo de calor devido a formação da Portlandina CH ((HASTENPFLUG; VIECILI, 2017) apud Vernet 2013). No estágio IV a etringita reage fornecendo sulfato para formar monossulfoaluminado resultado em um curto pico de aumento, no estagio V o cimento já está rígido dificultando a entrada de água encerrando o processo químico de pega ((HASTENPFLUG; VIECILI, 2017) apud Vernet 2013).

Figura 4 – Gráfico teórico da liberação de calor durante a hidratação do cimento Portland.



Fonte: (HASTENPFLUG; VIECILI, 2017) apud (QUARCIONI, 2008).

3 METODOLOGIA

O objetivo do estudo é obter uma estimativa do processo de cura do cimento por meio das reações exotérmicas discutido anteriormente. Então para medir o fluxo de calor usou-se a placa desenvolvida pela Paula Lima (2021) que optou pela técnica de fio quente para sua tese, por ser um método apropriado para características de porosidade e umidade, nesse trabalho expandiu-se a afirmação para o cimento. O circuito irá coletar a variação da resistência durante o processo, conforme apresentado anteriormente. Em conjunto com o experimento adicionou-se um módulo *Soil Molsure Sensor v1.2* que opera como sensor capacitivo, com o intuito de auxiliar a análise por meio da variação da capacitancia.

No gráfico do fluxo de calor teórico, até o estágio IV o cimento não está totalmente rígido permitindo a passagem de água entre camadas, então espera-se medir a umidade interna pela permissividade elétrica do material. A proposta foi apresentada no artigo de Li e Mingchen (2019) todavia com outra abordagem de construção. Os gráficos gerados serão confrontados para identificar padrões com os estágios teóricos do cimento.

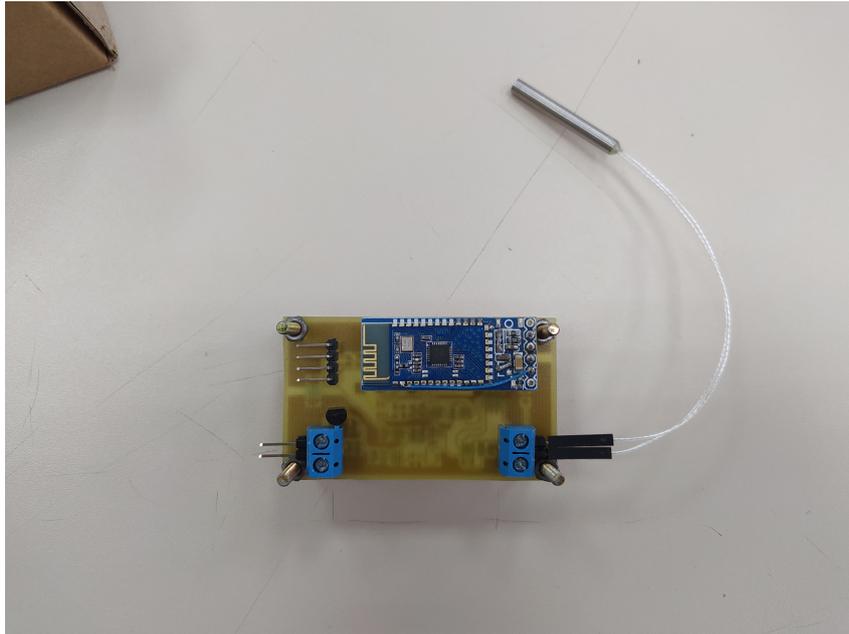
Para realizar o experimento exploratório usou-se os seguintes componentes:

- PT100;
- O *hardware* de baixo custo da tese da Paula Lima (2021);
- Um Arduino Uno R3;
- Módulo Capacitive Soil Molsure Sensor 1.2v;
- Um notebook com Bluetooth integrador;
- Fonte chaveada;

3.1 DISPOSITIVO COM O PT100

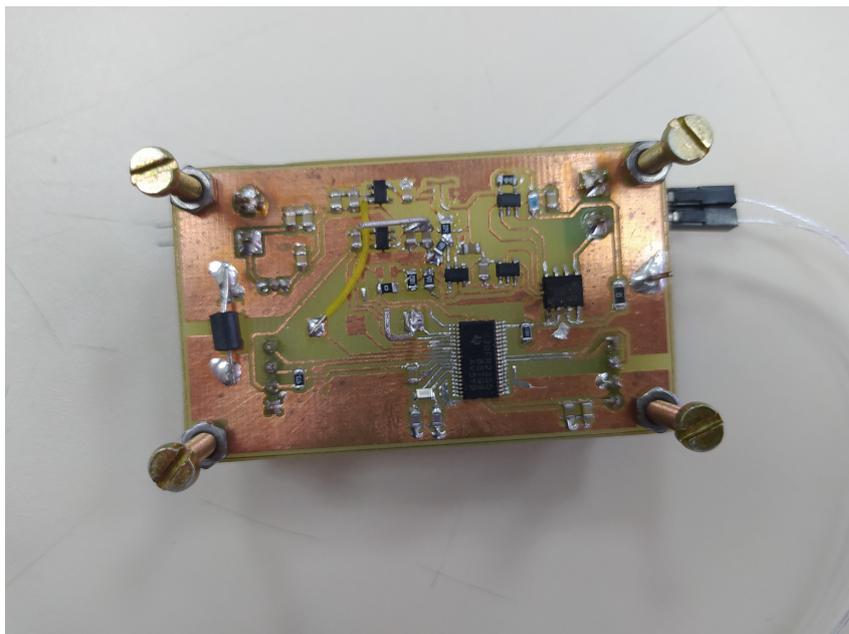
O circuito de baixo consumo desenvolvido na tese de mestrado da Paula Lima (2021), captura o fluxo de calor de um corpo usando um PT100, para o experimento usou-se o *hardware* original sem modificações. Apesar do projeto ter sido pensado para um RTD, é utilizado o PT100 para validação da placa conforme defendido na tese. Nas Figuras 5 e 6 é mostrado o *hardware* com a vista superior e inferior, os pinos da parte superior são respectivamente a alimentação de corrente contínua (CC), conexão para o PT100 e quatro pinos para gravação.

Figura 5 – Vista superior da placa com circuito resistivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

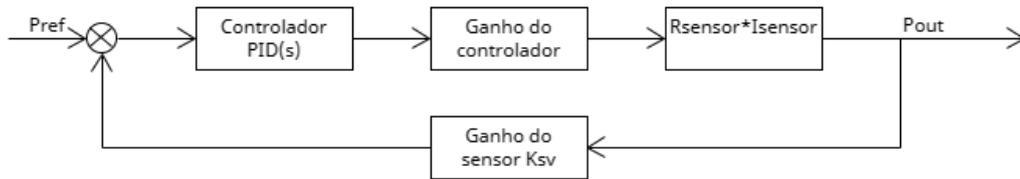
Figura 6 – Vista inferior da placa com circuito resistivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O dispositivo executa duas rotinas, a primeira realizar o aquecimento da resistência que significa injetar corrente no PT100 para dissipar potência por meio do calor. Quanto maior a resistência, menor a corrente fluindo pelo sensor em consequência menor a potência sob o resistor, então a rotina de controle atua para manter a potência constante de 80 miliwatts por meio de um Proportional Integral Derivative (PID) em uma malha de corrente. O diagrama da Figura 7 demonstra resumidamente a planta de controle do sistema.

Figura 7 – Diagrama simplificado da malha de corrente

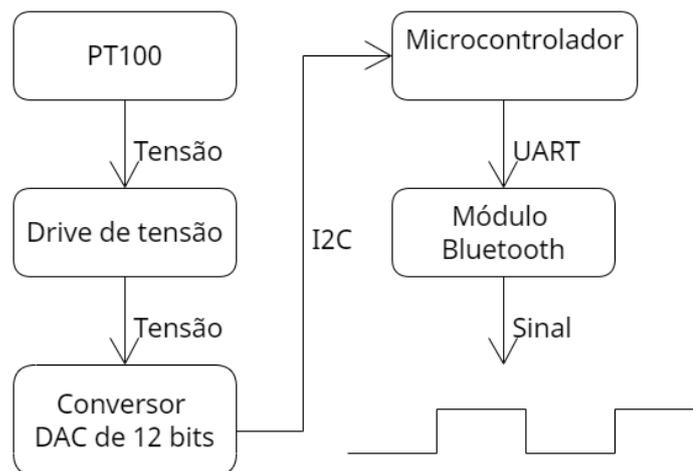


Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda rotina é o envio das informações via Bluetooth lido pelo conversor *Digital to Analog Converter* (DAC) de dez bits e transmitido por I_2C para o microcontrolador. Os dados são concatenados em uma String e enviados via *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) até o módulo HC-05 que transmitirá via Bluetooth, o diagrama da Figura 8 mostra o passo a passo da rotina feita pelo sistema. As informações enviadas por *streaming* são descritas abaixo:

1. O tempo decorrido a partir do momento que começou a transmissão de dados;
2. O valor do DAC sem conversão;
3. O valor do DAC convertido em tensão;
4. Tensão no divisor resistivo de entrada no circuito;
5. O valor da resistência do sensor vez mil;

Figura 8 – Diagrama do envio dos dados do PT100 até o computador

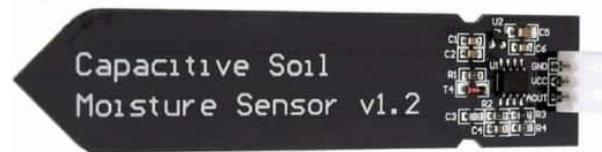


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MÓDULO DE UMIDADE DO SOLO

O módulo *Capacitive Soil Moisture Sensor* (Figura 9) usado no projeto consiste em um sensor capacitivo que varia a capacitância de acordo com o dielétrico, quando maior a quantidade de água menor a capacitância resultante (BRAMPTON, 2022). O circuito da placa é visto na Figura 10 que consiste em um filtro passa-baixas e um circuito integrado (CI) Timer 555, responsável por gerar o sinal que transitará nos terminais isolados. A variação de tensão no capacitor de saída varia de zero a três volts limitado por um divisor resistivo no mesmo circuito (BRAMPTON, 2022).

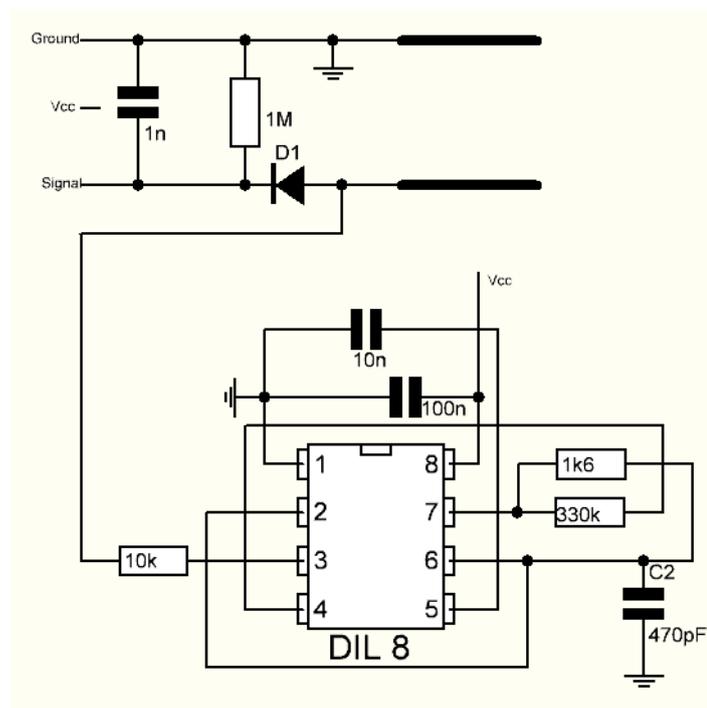
Figura 9 – Placa do sensor capacitivo.



Fonte: (BRAMPTON, 2022).

A obtenção do sinal é feita por um conversor analógico digital integrado de dez bits do Arduino, devido a placa do sensor capacitivo possuir um regulador de tensão não é necessário nenhum outro drive entre ambos (ARDUINO FOUNDATION, 2022). O valor do DAC sem tratamento é lido e enviado via UART para o computador por USB, a rotina construída usa as biblioteca e parâmetros padrão da IDE Arduino.

Figura 10 – Circuito do sensor capacitivo



Fonte: (BRAMPTON, 2022).

3.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Para realizar a validação do dispositivo de baixo consumo aplicado no cimento, foi confeccionado uma amostra com os materiais listados na Tabela 1. Para montar a amostra escolheu-se um molde metálico de 500 mililitros untado com óleo automotivo na parede interna, devido as dimensões do molde optou-se por não utilizar brita na pasta. O cimento foi misturado com água em um recipiente metálico até formar uma mistura homogênea, em seguida foi colocado na forma. Para garantir que o cimento ocupe todo o volume do molde, aplicou-se vibração na base por três minutos.

Tabela 1 – Materiais usados na confecção de uma amostra

Material	Quantidade
Cimento CP32	300g
Água	87g

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o corpo de prova pronto apresentando uma fina lâmina de água na superfície, enterrou-se o PT100 cobrindo toda a capa metálica ficando uma parte do cabo na parte superior conforme mostrado na Figura 11. O sensor de umidade do solo foi posicionado verticalmente até a marca de tinta, deixando apenas o circuito para fora. Houve cuidado com o posicionamento para que ambos os sensores não fiquem muito próximos gerando entrada espúria para o sistema. O diagrama com os todos os periféricos ligados é visto na Figura 12.

Figura 11 – Experimento montado

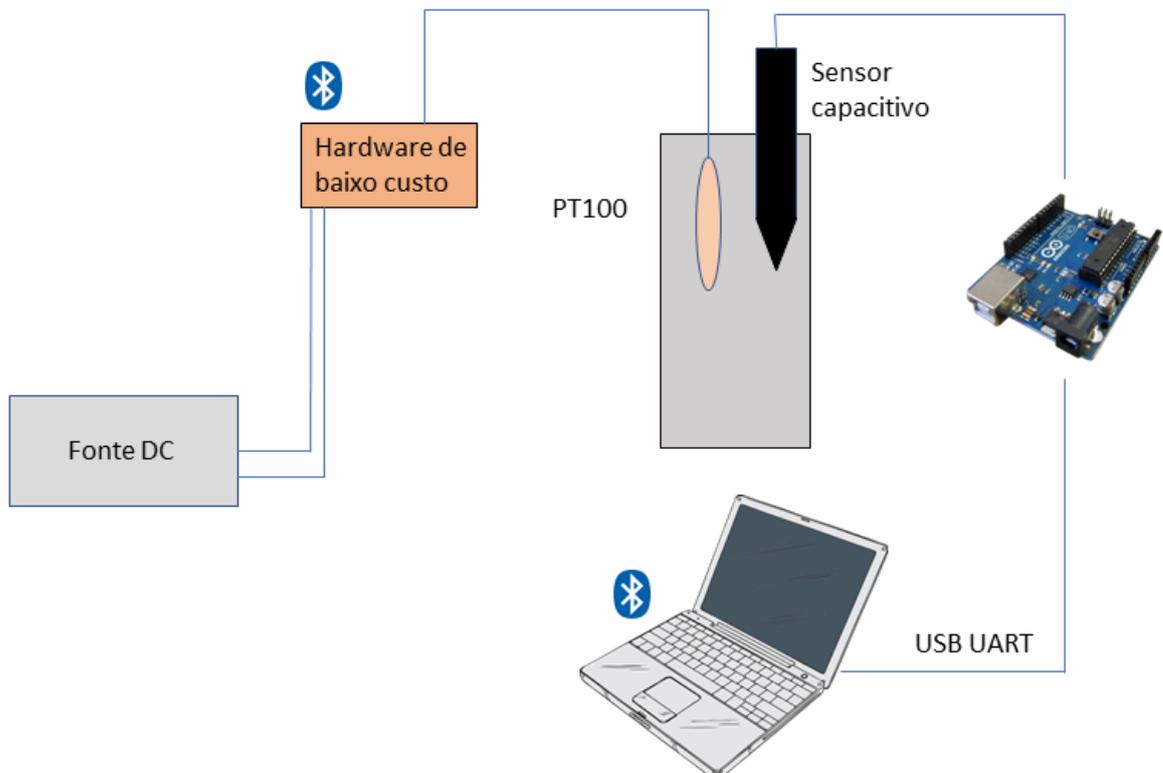


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado anteriormente, o tempo de cura depende de uma série de fatores, para esse experimento foram coletados quatro dias de dados, tendo como base o tempo de enrijecimento do cimento com aproximadamente mais um dia de segurança conforme apresentado em (HASTENPFLUG; VIECILI, 2017). O tempo zero começou a partir do momento em que os sensores foram inseridos na amostra e ligados, estima-se um intervalo de dez minutos até o efetivo registro das informações.

O *hardware* do sensor resistivo é alimentado com uma fonte linear definido em dez volt sem limitação de corrente e o capacitivo por meio USB do computador entregando cinco volts até 50 miliamperes. O gerenciamento da coleta de dados transmitidos via Bluetooth e UART ficou para o *software Terminal* que armazena os dados coletados em arquivos de texto, cada protocolo precisou-se de uma aba do programa já que a aplicação não suporta manter mais de uma conexão por sessão. Devido a dinâmica e incerteza dos dados a serem lidos, porque o comportamento do cimento varia dependendo do lote usado, optou-se por usar a frequência de cinco pontos por segundo.

Figura 12 – Diagrama do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS DO CIMENTO

Para fazer o tratamento dos dados brutos dos dois experimentos utilizou-se o Jupyter Notebook, um *framework* do Python que permite colocar texto em Markdown entre códigos bem como escolher a ordem que será executado o código. A aplicação suporta Kernel de outras linguagens de programação como Octave e R, muito utilizado por profissionais do ramo da ciência de dados. O código desenvolvido para a análise dos dados brutos pode ser consultado no Apêndice A.

Os arquivos de texto em formato de *Comma Separated Values* (CSV) gerados durante a coleta foram manuseados com a biblioteca *open-source* Pandas que permite criar e operar *dataframes*. Em termos elucidativos, pode-se considerar que se trata de uma matriz de informações tabuladas, conferindo a possibilidade de aplicar anotações que favorecem a estruturação dos dados, sendo possível exportá-los através de representações gráficas. Os recursos de filtragem disponíveis contribuem para a identificação de padrões e a estabelecimento de tendências, valendo-se de abordagens estatísticas.

Conforme apresentado anteriormente a planta de controle manterá a resistência com potência constante, porém devido a característica do sistema haverá uma pequena oscilação na resistência do sensor ao aquecer e resfriar. Como consequência o gráfico apresentará um ruído, para filtrar os pontos indesejados será aplicado uma média dos valores, com a taxa de amostragem em cinco dados por segundo, cada hora conterà 18000 pontos.

4 RESULTADOS

A proposta deste trabalho é conseguir monitorar o andamento do processo de cura por meio do PT100 de maneira a extrair informações suficientes para tal afirmação. O sensor capacitivo presente no experimento servirá para auxiliar no entendimento e exploração dos dados coletados fornecendo outro parâmetro físico de comparação.

Conforme exposto na metodologia os resultados dos quase quatro dias de coleta resultaram em 93 horas de experimento, os dados do *hardware* de baixo consumo foram plotados na Figura 13. Para entender melhor o resultado foi confrontado com a curva teórica do fluxo de calor na Figura 4 para traçar padrões e semelhanças, por tanto a análise seguirá por estágios. Em primeiro momento é possível observar que o dispositivo com o PT100 é capaz de registrar as reações exotérmicas do cimento como descrito anteriormente.

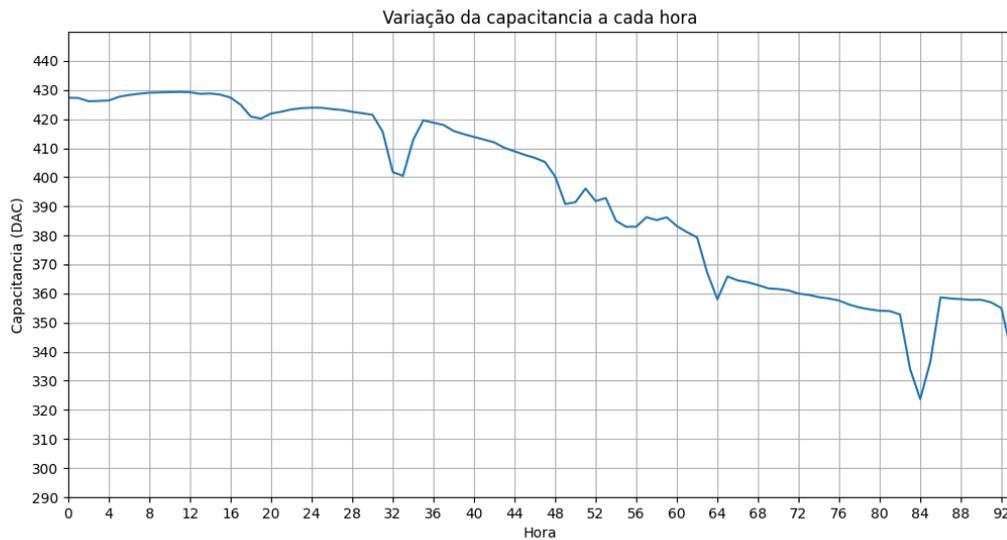
Figura 13 – Dados tratados do PT100 a cada hora.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado do sensor capacitivo é visualizado na Figura 14. É importante ressaltar que mesmo com aplicação da média o sensor apresentou descontinuidade decorrente da não linearidade do sensor. Com o avanço da cura do cimento a capacitância diminuiu, decorrente da perda de umidade para o ambiente como explicado na fundamentação. Durante a execução não houve hidratação do corpo de prova e implementação de técnicas de contenção após a mistura, então a tendência de queda está de acordo como o previsto.

Figura 14 – Dados tratados do sensor capacitivo a cada hora.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da 40^ª hora a capacitância cai acentuadamente, já a leitura do PT100 mantém a resistência oscilando entre 1.2Ω durante o restante do experimento. Para melhor visualização dos estágios a Figura 15 e Figura 16 evidencia os intervalos com base no padrão da Figura 4 em que o limite de cada região é definido na Tabela 2. A tendência do PT100 a partir da 56^ª hora equivalente ao estágio V explicado por conta do enrijecimento das camadas do cimento, parando as reações químicas exotérmicas conforme apresentado.

Tabela 2 – Limites teóricos dos estágios no gráfico do PT100.

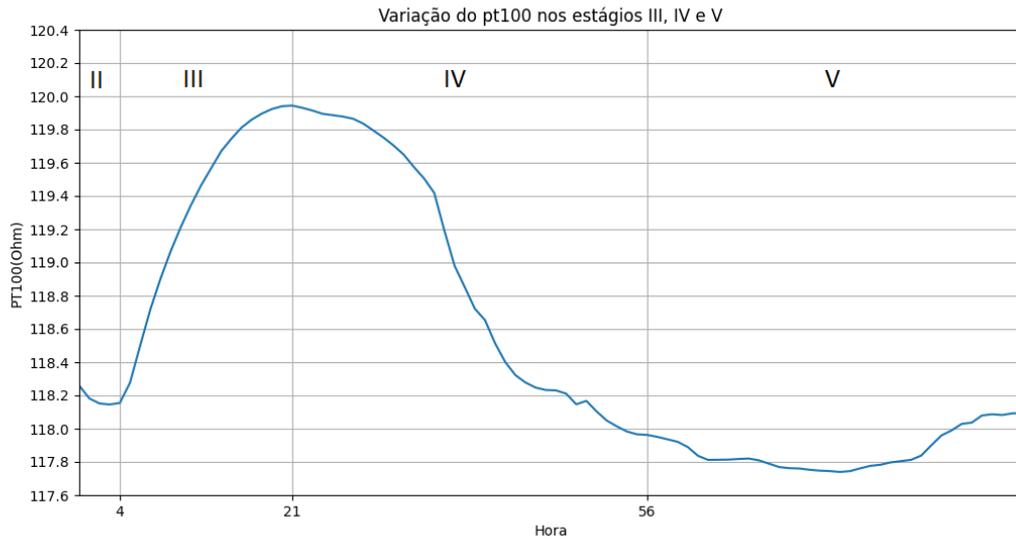
Estágios	Intervalo [Horas]
II	[00,04]
III	[04,21]
IV	[21,56]
V	[56,93]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que existe um *offset* de resistência no gráfico, levando em conta que o PT100 à zero graus apresentam 100Ω , isso se deve pela dissipação de calor em cima da resistência elevando a média dos valores decorrente da técnica de fio quente. Existem duas entradas espúrias para esse sistema que não foram controlados e que podem ter influenciado os resultados: a umidade e temperatura da sala. Mesmo que controladas por um ar-condicionado à 24°C não é possível estimar o erro e variação dos mesmo durante o experimento.

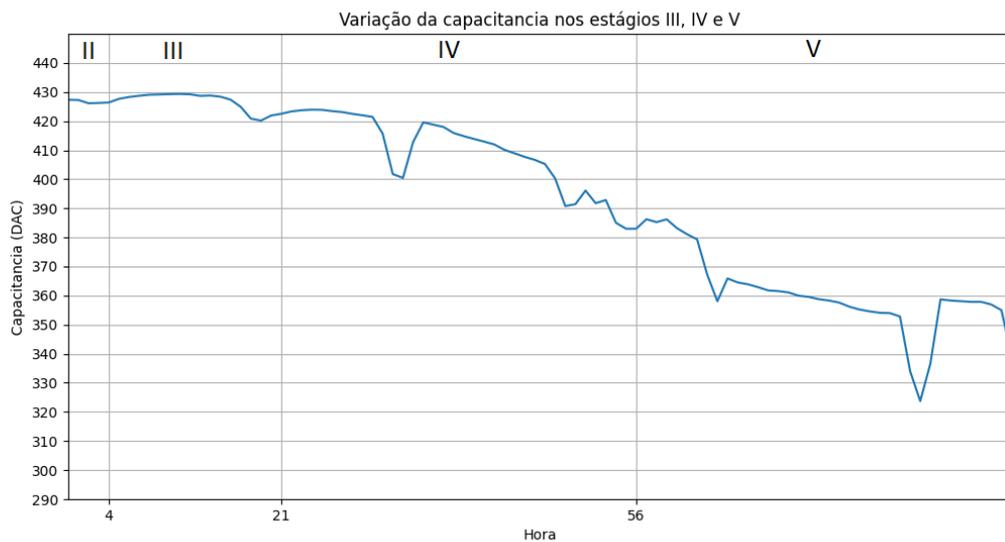
Existem comportamentos da Figura 4 que não foram registrados pelos dois periféricos, como exemplo o pico acentuado para o estágio I decorrente da adição da água junto com os íons livres do cimento. Uma hipótese é o intervalo de deslocamento

Figura 15 – Separação em estágio do gráfico do PT100.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Separação em estágio do gráfico do sensor capacitivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

de dez minutos entre o local de preparação da amostra até o laboratório escolhido para monitorar, a reação química pode ter ocorrido durante o trajeto. O mesmo vale para o estágio II período de indução, ambos reagem nos primeiros minutos de vida.

A transformação da etringita que ocorreria no estágio IV não é observável, um fator que pode ter contribuído é a umidade interna do bloco já esteja abaixo do necessário. Reforçando a ideia que após o segundo dia a umidade do corpo já não seria suficiente para propiciar as reações químicas, justificando a queda da capacitância no sensor de solo na Figura 14.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a ideia de aplicar um *hardware* de baixo custo desenvolvido pela Paula Lima para monitorar o processo de cura do cimento, ao qual mostrou-se promissor para registrar o fluxo de calor que ocorre internamente. A técnica de fio quente aplicado no PT100 funcionou de maneira satisfatória na mistura capturando as diversas reações químicas até o estado de curado.

A aplicação do sensor capacitivo de umidade do solo como parâmetro extra para a análise apresentou-se ineficaz para capturar a umidade de um corpo de cimento, o circuito responsável apresentou descontinuidades que a primeiro momento desqualifica-o para realizar técnicas de linearização. Uma hipótese para as descontinuidades é problema com ruídos presentes no circuito, a alimentação da placa está de acordo com o *datasheet* mesmo sendo provida por meio do regulador de tensão do Arduino que limita o fornecimento em 40 miliamperes.

Devido a ausência de calibração anterior ao experimento não foi realizado a validação das conversões de unidades para temperatura e umidade, de maneira a facilitar a visualização dos dados. Limitando a análise em capturar variação da capacitância e resistência do PT100 impedindo uma comparação de escala e intensidade com o artigo de Hastenpflug (2017) de calorimetria semi-adiabática. Para uma validação completa das regiões que envolve a cura, recomenda-se usar um método especificado na NBR. Como exemplo de ensaio está o Vicat, para medir a dureza e análise espectral para detectar os compostos da amostra.

Para trabalhos futuros, é sugerido fazer a comparação dos resultados com equipamentos graduados em temperatura e umidade para validar a conversão das unidades dos dispositivos usados no experimento. Refazer o experimento em um ambiente controlado para garantir que todas as reações químicas aconteçam, utilizando como exemplo uma câmara de umidade controlada que garanta a umidade acima de 90% conforme a NBR.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Fundamentos de instrumentação**. São Paulo: Pearson, 2013.
- ARDUINO FOUNDATION. **Datasheet Arduino Uno R3**. 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em 30 de maio de 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Informação e documentação: sumário. Rio de Janeiro, 2004.
- BRAMPTON. **How to Eletronics**. 2022. Disponível em: <https://how2electronics.com/interface-capacitive-soil-moisture-sensor-arduino/>. Acesso em 30 de maio de 2023.
- HASTENPFLUG, D.; VIECILI, M. J. C. Comparativo entre o teste de vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos portland. v. 23, n. 3, 2017. ISSN 1517-7076.
- HEALY, J.; KESTIN, J. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity. **Physica B+C**, v. 82, n. 2, p. 392–408, 1976. ISSN 0378-4363. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378436376902035>.
- HENN, D. M.; KAILER. A influência da cura do concreto na resistência a compressão axial. **FACEAR**, p. 1–2, 2021.
- JUNIOR, M.; JOSE, C. Riversense: Um sistema para monitoramento de rios através de redes de sensores sem fio. 2013.
- LI, N. et al. Detection of single steel strand distribution in grouting duct based on capacitive sensing technique. **Sensors**, v. 19, n. 11, 2019.
- LIMA, P. L. D. Proposta de um sensor de baixo custo para medir condutividade térmica. [s.n.], Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Campinas, SP, 2021. Tese de metrado.
- QUARCIONI, V. A. influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland - estudo em pasta: Tese de doutorado. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2008.
- RESNICK, H. . **Fundamentos de física**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2012.

APÊNDICE A - JUPYTER NOTEBOOK COM O TRATAMENTO DOS DADOS BRUTOS

Coleta de dados de uma amostra de cimento

Lucas Barros Dallamico

Código para plotar os dados coletados durante os dias 13 a 15 de abril 2023

```
In [51]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

Importando os dados para o ambiente

```
In [52]: list_pt100_files = [
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\pt100",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\pt100",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\pt100",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\pt100",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\pt100"
]
```

```
In [53]: list_ard_files = [
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\ardu",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\ardu",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\ardu",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\ardu",
"C:\\Users\\lucas\\Documents\\plot_curva_concreto\\Dados_segunda_amostra\\ardu"
]
```

Montando o dataframe do sensor capacitivo do arduino

```
In [54]: ard_list_df = []
for ele in list_ard_files:
    aux = pd.read_csv(ele)
    aux.columns = ["Capacitivo value"]
    ard_list_df.append(aux)
ard_df = pd.concat(ard_list_df)
```

Montando o dataframe do sensor resistivo

```
In [55]: pt100_list_df = []
for ele in list_pt100_files:
    aux = pd.read_csv(ele, sep=";")
    aux.columns = ["Tempo", "DAC", "Valor DAC", "Vin OPAMP", "Rsensor x 1000"]
    pt100_list_df.append(aux)
pt100_df = pd.concat(pt100_list_df)
```

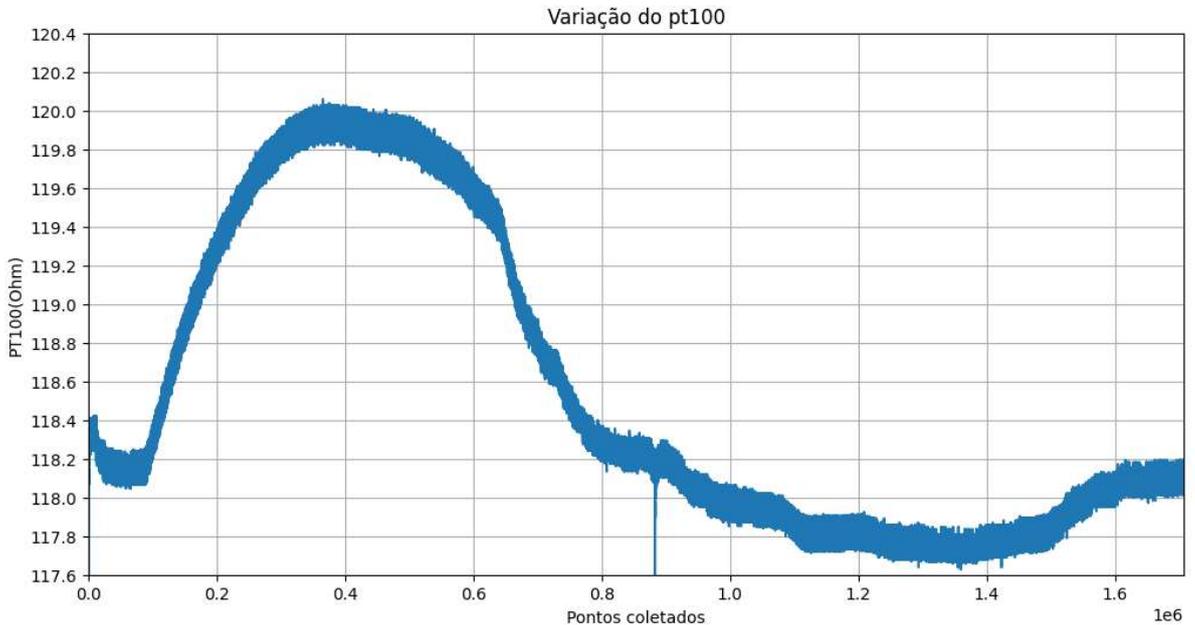
O gráfico dos dados brutos do pt100

```
In [56]: qnt_ele = pt100_df["Rsensor x 1000"].count() # me retorna a quantidade de linhas
xele = np.arange(start=0, stop=qnt_ele, step=1)
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(xele, (pt100_df["Rsensor x 1000"]/1000))
fig.set_size_inches(12,6)
ax.set_ylim([117.6,120.4])
```

```

ax.set_xlim([0, len(xele)-1])
ax.set_ylabel("PT100(Ohm)")
ax.set_yticks(np.arange(start=117.6, stop=120.4, step=0.2))
ax.set_title("Variação do pt100")
ax.set_xlabel("Pontos coletados")
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/bruto_pt100.png')
plt.show()

```



Com o conjunto de dados de resistência do pt100, vou fazer a média dos sinais por hora de acordo com a taxa de amostragem

```

In [57]: # Vou tirar os dados do dataframe
dados_resis = pt100_df["Rsensor x 1000"]/1000
# quantidade de elementos
qnt_dados_r = pt100_df["Rsensor x 1000"].count()
sample_rate = 60*60*5 # meu dados tem uma taxa de amostra de 5 por seg

counter = 1
aux = 0
Y_pt100_media = []

for values in dados_resis:
    if counter == sample_rate:
        aux += values
        counter = 1
        Y_pt100_media.append(aux/sample_rate)
        aux = 0
    else:
        aux += values
        counter += 1

X_pt100_media = np.arange(start=0, stop=len(Y_pt100_media), step=1)

```

```

In [58]: fig, ax = plt.subplots()
fig.set_size_inches(12,6)
ax.plot(X_pt100_media, Y_pt100_media)
ax.set_ylim([117.6, 120.4])
ax.set_xlim([0, len(X_pt100_media)-1])
ax.set_ylabel("PT100(Ohm)")

```

```

ax.set_title("Variação do pt100 a cada hora")
ax.set_xlabel("Hora")
ax.set_xticks(np.arange(start=0, stop=len(Y_pt100_media), step=4))
ax.set_yticks(np.arange(start=117.6, stop=120.4, step=0.2))
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/limpo_pt100.png')
plt.show()

```



O ângulo de aceleração da reação é:

```

In [59]: y = 119.8
yo = 119.2
x = 16
xo = 4
alpha = (x - xo) / (y - yo)
print(alpha)

```

20.00000000000019

O ângulo de desaceleração da reação é:

```

In [60]: y = 118.5
yo = 119.9
x = 44
xo = 20
alpha = (x - xo) / (y - yo)
print(alpha)

```

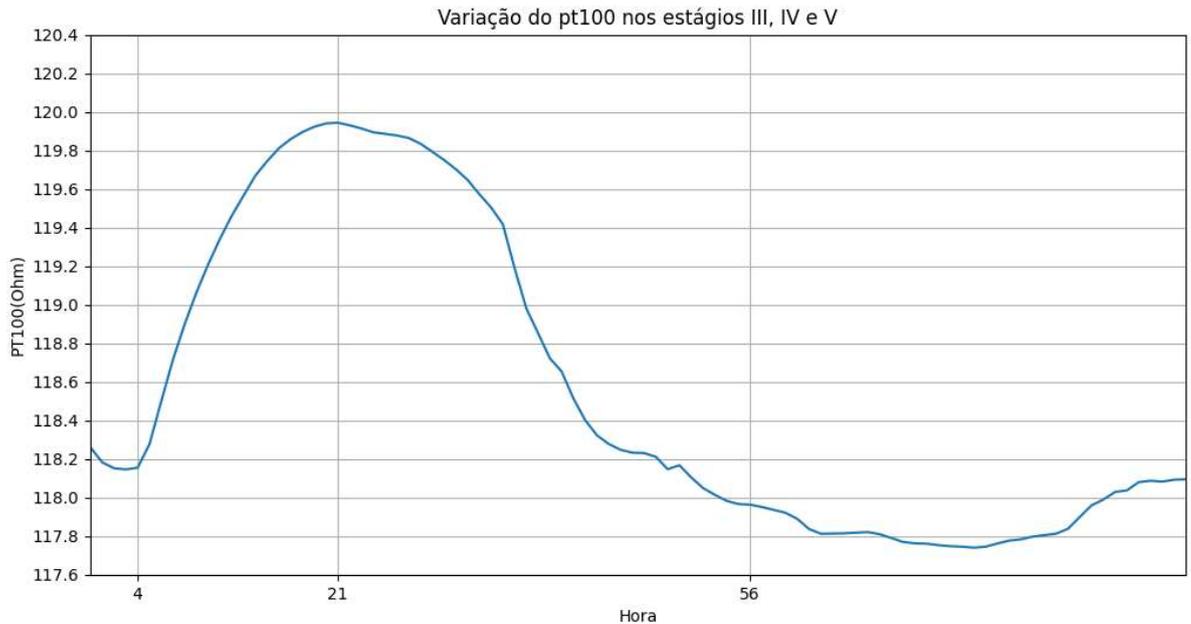
-17.142857142857075

```

In [61]: fig, ax = plt.subplots()
fig.set_size_inches(12,6)
ax.plot(X_pt100_media,Y_pt100_media)
ax.set_ylim([117.6,120.4])
ax.set_xlim([0,len(X_pt100_media)-1])
ax.set_ylabel("PT100(Ohm)")
ax.set_title("Variação do pt100 nos estágios III, IV e V")
ax.set_xlabel("Hora")
ax.set_xticks([4, 21, 56])
ax.set_yticks(np.arange(start=117.6, stop=120.4, step=0.2))
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado

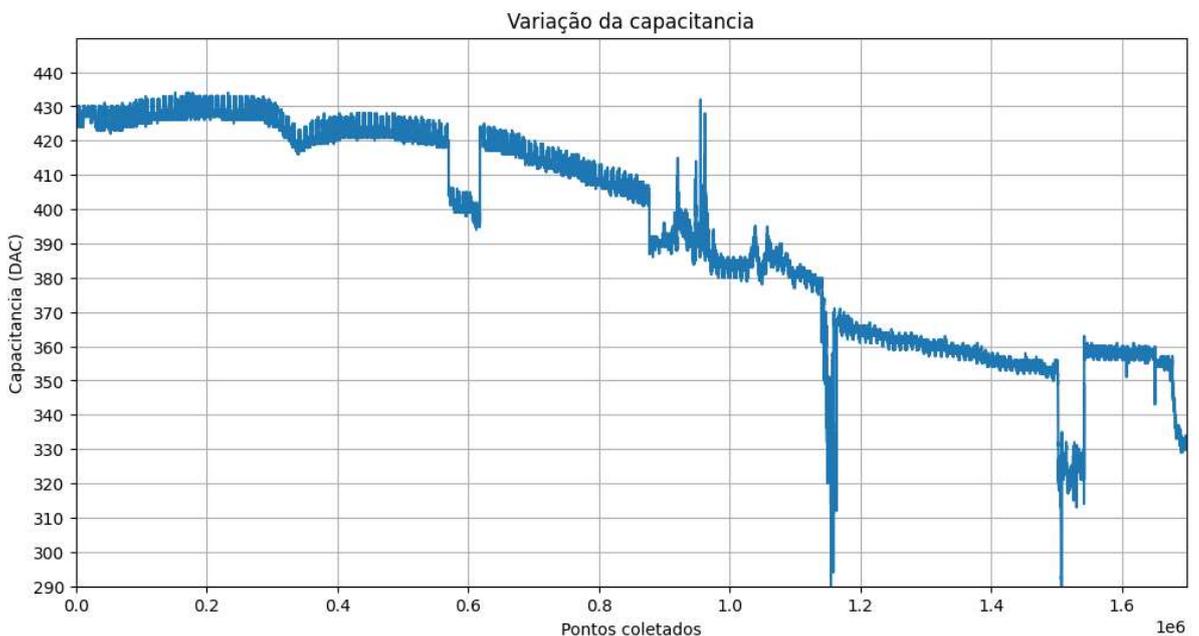
```

```
plt.savefig('graficos/estagio_pt100.png')
plt.show()
```



Os dados brutos do sensor capacitivo no arduino

```
In [62]: qnt_ele = ard_df["Capacitivo value"].count() # me retorna a quantidade de Linhas
xele = np.arange(start=0, stop=qnt_ele, step=1)
fig, ax = plt.subplots()
fig.set_size_inches(12,6)
ax.plot(xele,ard_df["Capacitivo value"])
ax.set_ylim([290,450])
ax.set_yticks(np.arange(start=290, stop=450, step=10))
ax.set_xlim([0, len(xele)-1])
ax.set_ylabel("Capacitancia (DAC)")
ax.set_title("Variação da capacitancia")
ax.set_xlabel("Pontos coletados")
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/bruto_arduino.png')
plt.show()
```



Com o conjunto de dados do sensor capacitivo, vou fazer a média dos sinais por hora de acordo com a taxa de amostragem

```
In [63]: # Vou tirar os dados do dataframe
dados_resis = ard_df["Capacitivo value"]
# quantidade de elementos
qnt_dados_r = ard_df["Capacitivo value"].count()
sample_rate = 60*60*5 # meu dados tem uma taxa de amostra de 5 por seg

counter = 1
aux = 0
Y_capac_media = []

for values in dados_resis:
    if counter == sample_rate:
        aux += values
        counter = 1
        Y_capac_media.append(aux/sample_rate)
        aux = 0
    else:
        aux += values
        counter += 1
X_capac_media = np.arange(start=0, stop=len(Y_capac_media), step=1)
```

```
In [64]: fig, ax = plt.subplots()
fig.set_size_inches(12,6)
ax.plot(X_capac_media,Y_capac_media)
ax.set_ylabel("Capacitancia (DAC)")
ax.set_title("Variação da capacitancia a cada hora")
ax.set_xlabel("Hora")
ax.set_ylim([290,450])
ax.set_xlim([0,len(X_capac_media)-1])
ax.set_xticks(np.arange(start=0, stop=len(Y_capac_media), step=4))
ax.set_yticks(np.arange(start=290, stop=450, step=10))
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/limpo_arduino.png')
plt.show()
```

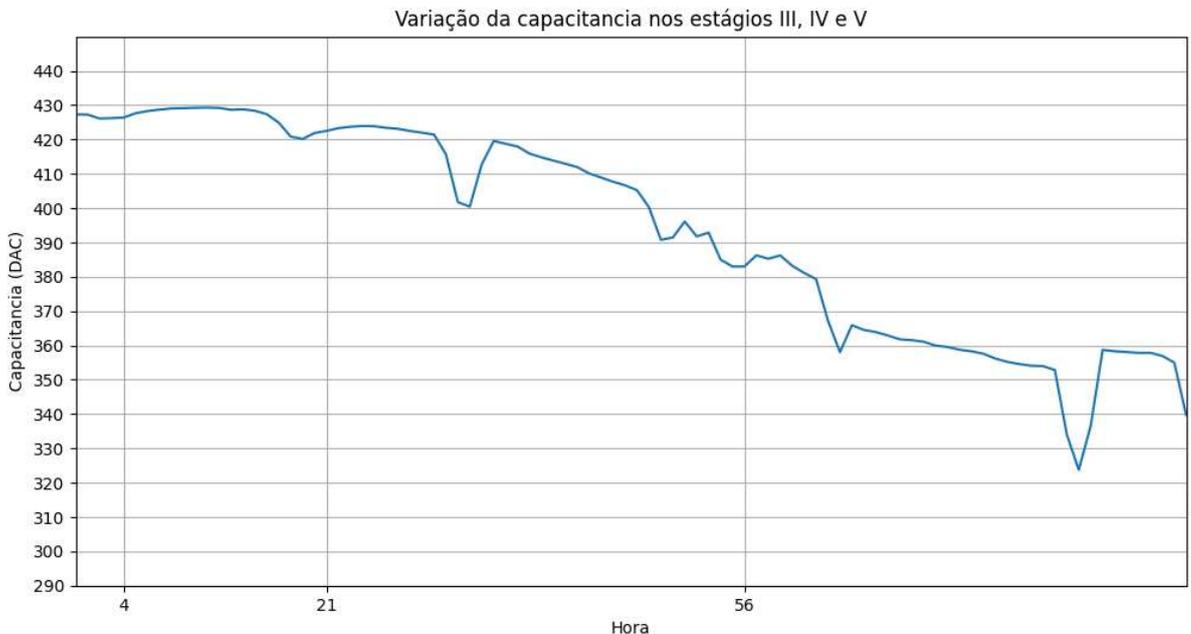


```
In [65]: fig, ax = plt.subplots()
fig.set_size_inches(12,6)
```

```

ax.plot(X_capac_media,Y_capac_media)
ax.set_ylabel("Capacitancia (DAC)")
ax.set_title("Variação da capacitancia nos estágios III, IV e V")
ax.set_xlabel("Hora")
ax.set_ylim([290,450])
ax.set_xlim([0,len(X_capac_media)-1])
ax.set_xticks([4,21,56])
ax.set_yticks(np.arange(start=290, stop=450, step=10))
ax.grid()
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/estagio_arduino.png')
plt.show()

```



Para fins de comparação, vou plotar um do lado do outro

```

In [66]: fig, axs = plt.subplots(1,2)
fig.set_size_inches(12,6)
# Para o gráfico com os dados do pt100
axs[0].plot(X_pt100_media,Y_pt100_media)
axs[0].set_ylim([117.6,120.4])
axs[0].set_xlim([0,len(X_pt100_media)-1])
axs[0].set_ylabel("PT100(Ohm)")
axs[0].set_title("Variação do pt100 a cada hora")
axs[0].set_xlabel("Hora")
axs[0].set_xticks(np.arange(start=0, stop=len(Y_pt100_media), step=8))
axs[0].set_yticks(np.arange(start=117.6, stop=120.4, step=0.2))
axs[0].grid()
# Para o gráfico com os dados do sensor capacitivo
axs[1].plot(X_capac_media,Y_capac_media)
axs[1].set_ylabel("Capacitancia (DAC)")
axs[1].set_title("Variação da capacitancia a cada hora")
axs[1].set_xlabel("Hora")
axs[1].set_ylim([290,450])
axs[1].set_xlim([0,len(X_capac_media)-1])
axs[1].set_xticks(np.arange(start=0, stop=len(Y_capac_media), step=8))
axs[1].set_yticks(np.arange(start=290, stop=450, step=10))
axs[1].grid()
# mostrar
# salvar o gráfico gerado
plt.savefig('graficos/comparacao_sensores.png')
plt.show()

```

