

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

FLÁVIO TÚLIO DE LIMA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE EM
CONCRETOS EM PROCESSO DE CURA**

Patos de Minas

2017

FLÁVIO TÚLIO DE LIMA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE EM
CONCRETOS EM PROCESSO DE CURA**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Elise Saraiva.

Patos de Minas

2017

FLÁVIO TÚLIO DE LIMA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE EM
CONCRETOS DURANTE A CURA**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, sob a orientação da Prof^ª. Dr^ª. Elise Saraiva.

Aprovado em Patos de Minas em 14 de dezembro de 2017

Banca Examinadora

Prof^ª. Dra. Elise Saraiva (orientadora) – FEELT / UFU

Prof. Me. Alexander Bento Melo – FEELT / UFU

Prof. Dr. Alexandre Coutinho Mateus – FEELT / UFU

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à professora Dra. Elise Saraiva por abraçar a ideia deste projeto. Agradeço pelo apoio técnico e científico e estímulo prestado durante a realização deste trabalho e pelo convívio humanizado e horizontalizado, tão em falta na Academia. Agradeço pela amizade firmada.

Ao Laboratório de Análises de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas, UNIPAM, por permitir o teste do protótipo na câmara úmida da instituição.

A professora Me. Sheilla Pereira Vieira, pelo apoio prestado na disponibilização de uso da já referida câmara úmida. A Douglas Ribeiro Oliveira, técnico do laboratório, pelo grande apoio prestado na instalação do protótipo na câmara.

À minha família, que sempre me apoiou de todas as maneiras durante a graduação.

Aos meus colegas de curso, sempre de prontidão para ajudar na caminhada e torna-la mais agradável. Fiz amigos para a vida toda.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Elétrica; seus ambientes, materiais e capital humano foram imprescindíveis em minha formação como engenheiro. Meus agradecimentos a todos seus docentes e servidores.

Agradeço também ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização deste projeto.

“Cipriano Algor queixa-se, queixa-se, mas não parece compreender que os barros amassados já não é assim que se armazenam, que às indústrias cerâmicas básicas de hoje pouco falta para se converterem em laboratórios com empregados de bata branca tomando notas e robôs imaculados cometendo o trabalho. Aqui fazem clamorosa falta, por exemplo, higrómetros que meçam a humidade ambiente e dispositivos electrónicos competentes que a mantenham constante, corrigindo-a de cada vez que se exceda ou míngue, não se pode mais trabalhar a olho nem a palmo, por apalpação ou farejando, segundo os atrasados procedimentos tecnológicos de Cipriano Algor, que acaba de comunicar à filha com o ar mais natural do mundo, A pasta está boa, húmida e plástica no ponto, fácil de trabalhar, ora, perguntamos nós, como poderá ele estar tão seguro do que diz se só lhe pôs a palma da mão em cima, se só apertou e moveu um pouco de pasta entre o dedo polegar e os dedos indicador e médio, como se, de olhos fechados, todo entregue ao sentido interrogador do tacto, estivesse a apreciar, não uma mistura homogénea de argila vermelha, caulino, sílica e água, mas o urdume e a trama de uma seda.”

(SARAMAGO, J.. A Caverna)

RESUMO

Este trabalho propõe desenvolver um sistema para controlar a umidade em concretos durante a cura. A ideia é que a manutenção da umidade que é feita de modo manual usando mangueiras, seja realizada de modo autônomo pelo sistema. Para isso, sensores medirão a umidade relativa dentro do concreto jovem e enviarão esta informação para uma central. Esta última decidirá se é necessário ou não molhar o concreto, e caso a resposta seja sim, ela envia comandos para um sistema de válvulas solenoides que permitem ou interrompem um fluxo de água sobre a estrutura de concreto que se deseja curar. Tal central é dotada de micro controlador, assim como os sensores e o sistema de válvulas. Estes subsistemas intercomunicam-se com a central por rádio. Um *display* de LCD exibe as informações de temperatura e umidade atuais. O tempo que o sistema fica ativo é definido no início, e depende do tempo de cura estipulado pelo engenheiro civil responsável.

Palavras-chave: controle de umidade, cura de concreto, micro controlador, sensores de umidade, câmara úmida

ABSTRACT

This work proposes the development of a system to control humidity on concrete slabs on the time of cure. The objective is that maintenance of humidity, currently done manually, will occur automatically. For this, sensors is going to measurer the relative humidity inside the concrete and will send this information to a central. This central will decide whether it is necessary to get wet the structure. If the answer is positive, the central will send commands to a system of solenoid valves that allow or not a water flux on the concrete that must to be cured. This central have a microcontroller, and the sensors and system of valves too. These subsystems communicates with the central by radio waves. A LCD display shows the information of temperature and humidity in the time. The time the system stay attached is settled at beginning, and depends of the time stipulated by civil engineer responsible for the work.

Keywords: humidity control, curing concrete slab, microcontroller, humidity sensors, wet chamber

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Floresta de concreto e aço	18
Figura 1.2 – Molhagem constante	19
Figura 2.1 – Câmara úmida para cura de corpos de prova	23
Figura 2.2 – Malha aberta.....	24
Figura 2.3 – Malha fechada	24
Figura 2.4 – Funcionamento de um controle on/off ao longo do tempo	26
Figura 2.5 – Válvula solenoide.....	27
Figura 4.1 - Sensor de umidade e temperatura HDC1080.....	34
Figura 4.2 - Sensor de umidade AM2302	34
Figura 4.3 – MSP430G2553 e LaunchPad	35
Figura 4.4 – <i>Display</i> QC1602.....	36
Figura 4.5 – Módulo transceptor nRF24l01+.....	37
Figura 4.6 – Topologia do sistema	38
Figura 4.7 – Estrutura da central	39
Figura 4.8 – Estrutura do subsistema de válvulas	39
Figura 4.9 – Hidráulica do projeto.....	40
Figura 4.10 – Estrutura dos sensores inseríveis.....	40
Figura 4.11 – Diagrama elétrico da central.	42
Figura 4.12 – Diagrama elétrico dos sensores em fio.....	43
Figura 4.13 – Esquema ligação válvulas solenoides e relé de estado sólido.....	44
Figura 4.14 – Algoritmo simplificado da central, ênfase na etapa de configuração do sistema pelo operador/usuário.	45
Figura 5.1 – Sensor sem fio.....	50
Figura 5.2 – Central.....	51
Figura 5.3 – Sistema de válvulas.....	51
Figura 5.4 – Teste de condensação.....	52
Figura 5.5 – Central instalada na câmara úmida, ao lado da entrada.....	54
Figura 5.6 – Central exibindo as informações de umidade e temperatura dentro da câmara úmida.....	54
Figura 5.7 – Subsistema de válvulas instado, com encanamentos flexíveis para transporte da água usada na cura.....	55
Figura 5.8 – Aspersor e sensor instalados na câmara úmida.....	55
Figura 5.9 – Aspersão de água dentro da câmara úmida.....	55
Figura 5.10 – Concretagem da área de teste.....	57
Figura 5.11 – Vedação do furo com cola quente.....	57
Figura 5.12 – Sistema montado para realização do teste.....	58
Figura 5.13 – Concretagem da nova área de teste.....	59
Figura 5.14 – Sistema montado para a realização de novo teste.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Umidade medida no concreto e condições climáticas no primeiro teste.	58
Tabela 5.2 – Umidade medida no concreto e condições climáticas no segundo teste.....	60
Tabela 5.3 – Custos aproximados do protótipo.....	61

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.1. Introdução	17
1.2. Objetivos.....	17
1.3. Justificativa	17
1.4. A estrutura deste trabalho	21
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Considerações Iniciais	22
2.2. Cura de concreto	22
2.2.1. Câmara úmida	23
2.3. Controle	23
2.3.1. Malha aberta e malha fechada.....	24
2.3.2. Controle on/off.....	25
2.4. Instrumentação.....	26
2.4.1. Válvula solenoide	27
2.4.2. Sensor de umidade relativa.....	27
2.5. Micro controladores	28
2.6. Considerações Finais	29
CAPÍTULO III - LEVANTAMENTO DE REQUISITOS	30
3.1. Considerações Iniciais	30
3.2. Umidade ideal do concreto durante a cura e requerimentos da câmara úmida.....	30
3.3. Interface	30
3.4. Robustez contra ruído e quedas de energia.....	31
3.5. Desligamento automático.....	31
3.6. Custos e disponibilidade de peças	31
3.7. Disposição dos sensores.....	31
3.8. Considerações finais	32
CAPÍTULO IV - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	33
4.1. Considerações Iniciais	33
4.2. Peças e módulos utilizados	33
4.2.1. Atuadores	33
4.2.2. Sensores.....	33

4.2.3. Microcontrolador	34
4.2.4. Interface	35
4.2.5. Transceptores	36
4.3. Topologias e diagramas de blocos.....	37
4.4. Diagramas elétricos	40
4.4.1. Diagrama elétrico da central	40
4.4.2. Diagrama elétrico dos sensores sem fio.....	43
4.4.3. Diagrama elétrico do sistema de válvulas	44
4.5. Algoritmos.....	44
4.5.1. Algoritmos da central	45
4.5.2. Algoritmo das válvulas	46
4.5.3. Algoritmo dos sensores sem fio.....	48
4.6. Considerações Finais.....	48
CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES	50
5.1. Considerações iniciais	50
5.2. O protótipo	50
5.3. Testes simulados.....	52
5.4. Testes na câmara úmida	54
5.5. Testes em pisos de concreto	56
5.5.1. Primeiro teste	56
5.5.2. Segundo teste	59
5.6. Custos do protótipo	61
5.7. Sugestões para trabalhos futuros	62
5.8. Considerações finais.....	62
REFERÊNCIAS.....	65

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

Nos canteiros de obras a automatização de processos já acontece. Moto niveladoras, rolos compactadores, pavimentadoras, entre outras máquinas já podem ser total ou parcialmente automáticas. E as construtoras já são capazes de enumerar vários benefícios resultantes dessa automatização [1].

O engenheiro eletrônico é protagonista nesse processo de automatização, uma vez que é preparado para projetar sistemas eletroeletrônicos capazes de monitorar, tomar decisões, e agir de modo autônomo ou semiautônomo.

O presente trabalho busca aproximar a Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do setor da construção civil, propondo-se a automatizar um processo que ainda hoje acontece de modo manual, que é a manutenção da umidade em concretos que estão sendo curados.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é construir o protótipo de um sistema (conjunto de equipamentos) capaz de monitorar a umidade em concretos jovens e atuar de modo a manter a umidade ideal para a cura. O equipamento deve monitorar a umidade e tomar decisões, de modo autônomo, acerca da necessidade de se molhar a estrutura. A molhagem também deve ser automática, usando-se, para isso, válvulas hidráulicas acionadas eletricamente.

O usuário deverá ser responsável apenas por montar o sistema na obra e fazer uma configuração inicial que defina o tempo que a cura será realizada. Este tempo deverá ser definido pelo engenheiro civil ou o responsável técnico pela obra, de acordo com o cimento usado e os resultados esperados.

Objetiva-se projetar um sistema que possa ser capaz tanto de atuar em estruturas de concreto finais como também possa ser utilizado para controlar a umidade de câmaras úmidas usadas na cura de corpos de prova, conforme exigências das normas técnicas [2] e [3].

1.3. Justificativa

O cimento Portland é um dos materiais mais usados na construção civil [4]. Assim sendo, é um material intensamente estudado pelos profissionais da área, que buscam aprimorar e compreender a fundo suas características, a fim de obterem estruturas cada vez mais duráveis, de rápida execução e menores custos. A Figura 1.1 ilustra o uso desse material.

Figura 1.1 – Floresta de concreto e aço.



*Fonte: Página do Flickr do fotógrafo Felipe Borges¹.
Trecho da avenida paulista, São Paulo, em 2011. O concreto domina as paisagens urbanas.*

Um dos processos necessários na obtenção de uma maior resistência para o concreto é o processo de cura. A cura do concreto constitui uma medida adotada para evitar a evaporação da água utilizada no amassamento do concreto e assim garantir que os componentes do cimento se hidratem [4]. Sobre a importância da cura, [5] pontua:

“A necessidade do concreto de alto desempenho ser curado constitui assunto polêmico no meio técnico e mesmo o tipo e duração da cura para os partidários de sua adoção são igualmente polêmicos. Já nos concretos convencionais, com maior relação a/c^2 , há unanimidade em aceitar que a cura adequada é condição essencial para obtenção de um concreto durável conforme as especificações do projeto estrutural”.

Apesar dessa importância, a cura do concreto é usualmente negligenciada, já que os procedimentos recomendados tendem a interferir negativamente na velocidade de execução da obra e não são percebidos como essenciais para a sua durabilidade [6].

Pode-se supor que parte dessa negligência para com o processo de cura se deve à demanda de mão de obra necessária para mantê-lo. Sendo assim, a automatização do processo de cura é uma ideia lógica.

Entre os vários métodos de cura empregados, o mais comumente utilizado é o da molhagem constante, que consiste em molhar repetida e constantemente as peças em concreto, fazendo-se uso de uma mangueira. Veja Figura 1.2. Para a aplicação desse método, é necessário

¹ Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/flborges/5347123443>>. Acesso em 28 jul. 2017.

² Relação água/cimento: indica o fator água/cimento usado na hidratação do cimento. É obtido pelo quociente do volume total de água, em litros, pela massa total de cimento seco, em quilogramas.

peçoal disponível em período integral para que o processo de cura se dê de forma ininterrupta [6]. Essa mesma referência [6] ainda completa:

“Rotineiramente, observa-se a interrupção do processo de molhagem ao final do dia e sua retomada no dia seguinte. Nesse contexto, importa ressaltar que, conforme reporta a bibliografia, essa interrupção, mesmo que ocorra no período da noite, implica a diminuição dos ganhos de resistência do concreto no período, assim como outros prejuízos à durabilidade da estrutura”.

Figura 1.2 – Molhagem constante.



*Fonte: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura: Fórum da construção³.
A molhagem constante consiste em molhar com mangueira as estruturas que devem ser curadas.*

Novamente a automatização do processo de cura se mostra uma alternativa racional na correta execução dessa etapa tão importante para a qualidade final do concreto.

É importante mencionar que outros dois métodos usados são uma variação da molhagem constante: a aspersão e a irrigação. Nesses dois casos a água também é jogada sobre a superfície do concreto a ser curado, no entanto em vez de usar uma mangueira faz o uso de aspersores, no primeiro caso, e o uso de mangueiras perfuradas como as utilizadas em sistemas de irrigação por gotejamento, no segundo caso [6]. Mesmo nesses métodos, porém, se faz necessário o uso de mão de obra, que é responsável por avaliar visualmente a necessidade da rega e iniciá-la ou interrompê-la através de torneiras ou válvulas.

Um quarto método, também comumente empregado, é a cobertura do concreto com mantas, sacos, tecidos, etc. Essas coberturas formam uma barreira à evaporação da água e geralmente necessitam estar saturados de água. Para que a cura se dê de forma satisfatória, os tecidos retentores de umidade devem ser mantidos úmidos [6].

³ Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=36&Cod=1906>>. Acesso em 28 jul. 2017.

Esse processo de manter úmidos esses tecidos é realizado por um dos três métodos descritos anteriormente. Fica evidente, portanto, o quanto a cura do concreto pelos métodos convencionais consome mão de obra.

Além do menor uso de mão de obra e as vantagens disso resultantes – como a ininterrupção do controle de umidade mesmo durante a noite e feriados; o que, por sua vez, garante uma maior qualidade na cura e, conseqüentemente, na resistência e durabilidade final do concreto –, a automatização da cura do concreto pode oferecer outra vantagem: o uso racional da água.

Ao criar um sistema de controle de umidade por malha fechada, evita-se que seja usada água sem necessidade, isto é, regas quando o concreto ainda se mantém adequadamente úmido. Porém, dizer que o uso final de água será de fato menor é uma conclusão que não deve ser feita imediatamente, sendo necessários estudos futuros, que não são o objetivo deste presente trabalho.

Este trabalho visa desenvolver o protótipo de um sistema de monitoramento e controle de umidade em concretos em processo de cura. Naturalmente é um processo que exige pesquisa e conhecimentos básicos acerca da teoria de concretos e de cura, a fim de levantar requisitos e compreender como o processo de monitoramento e de controle deve ser realizado. No entanto, para informações avançadas sobre estes assuntos, bibliografia específica da área de engenharia civil deverá ser consultada.

Do mesmo modo, a mensuração de características de concretos curados por meio do uso do sistema que será desenvolvido (bem como comparações com resultados obtidos em concretos curados de outras maneiras), visando avaliar a pertinência do uso do sistema em situações reais, não é o objetivo desse trabalho e fica como sugestão de pesquisa futura.

1.4. A estrutura deste trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho é estruturado da seguinte forma:

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Tem como objetivo apresentar conceitos de cura de concretos, de controle e de micro controladores.

Capítulo III – Levantamento de requisitos

Tem como objetivo enumerar os principais requisitos que devem ser cumpridos pelo protótipo.

Capítulo IV – Desenvolvimento do protótipo

Objetiva descrever o processo de projeto e construção do protótipo, descrevendo escolha de peças, diagramas elétricos, algoritmos, etc.

Capítulo V – Resultados e conclusões

Objetiva revelar os resultados obtidos, discuti-los, discriminar os custos totais do protótipo e dar sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais

Como qualquer projeto de pesquisa, este também se fundamenta na literatura da área.

Neste capítulo serão abordados conceitos necessários para o prosseguimento do trabalho, como noções sobre cura de concreto, controle e automação, instrumentação e micro controladores.

2.2. Cura de concreto

O concreto tem grande utilização na construção civil devido a sua alta durabilidade, versatilidade e resistência [4].

Basicamente, o concreto é uma mistura de cimento Portland, água e agregados (normalmente areia e britas). O cimento reage quimicamente com a água e forma uma pasta aglomerante que mais tarde solidifica-se e se torna insolúvel. A cura consiste em evitar a evaporação prematura da água necessária para hidratar o cimento. Esta hidratação é responsável pela pega⁴ e endurecimento do concreto. Idealmente o concreto deve permanecer saturado de água, até que os espaços inicialmente ocupados por esta substância sejam ocupados pelos produtos da hidratação do concreto [4].

Uma cura adequada melhora o desempenho do concreto, já que reduz sua porosidade [4]. A cura também diminui a retração que o concreto sofre durante a secagem. Além disso, características superficiais também são melhoradas com uma cura adequada, como menor permeabilidade, menor susceptibilidade à carbonatação⁵ e fissuração [5].

A referência [6] enumera vários tipos de cura que podem ser adotados. Todas visam, de algum modo, manter alta a umidade dentro do concreto. Desde molhar a superfície do concreto periodicamente até cobri-lo com uma camada de produto químico específico, que forma uma película que impede a evaporação da água, passando também pela cobertura com matérias como lona, papel ou mantas. A mais comum é a molhagem constante e suas variações. A molhagem é realizada manualmente por um operador, ou então é realizada com o uso de mangueiras ou aspersores posicionados sobre a superfície que deve ser curada.

⁴ Pega: A pega do concreto se refere à hidratação deste, quando ele passa a se solidificar. A cura é realizada após o final do tempo de pega, depois que o concreto já se solidificou. Antes disso, o estado do concreto é definido como “plástico”, que é quando o concreto ainda pode ser aplicado e trabalhado.

⁵ Carbonatação: Deterioração sofrida pelo concreto devido à reação com gás carbônico atmosférico. O gás se liga à umidade e forma ácido carbônico, que reage com componentes do concreto, especialmente o hidróxido de cálcio, formando sais.

O tempo de cura varia do tipo de cimento usado e também a relação a/c que foi empregada. Quanto maior a relação a/c, maior deve ser o tempo de cura [5].

2.2.1. Câmara úmida

Corpos de prova são cilindros de concreto usados para avaliar as características de determinado lote de concreto fresco. Uma amostra do concreto é retirada e moldada. Posteriormente submete-se os cilindros a ensaios diversos para avaliar a qualidade do concreto. Esses corpos são curados em tanques, submersos, ou em câmaras úmidas, semelhantes à mostrada na Figura 2.1.

As normas técnicas [2] e [3] estipulam que a umidade relativa dentro de uma câmara úmida para cura de corpos de prova deve ser superior a 95%.

Figura 2.1 – Câmara úmida para cura de corpos de prova.



Fonte: Fernandes Engenharia⁶.

Corpos de prova de concreto devem ser mantidos num ambiente com umidade e temperatura controlados.

2.3. Controle

O Controle Automático tem papel vital no avanço da ciência e da tecnologia. Com ele tem sido possível controlar variáveis diversas nos mais variados processos científicos, industriais e até mesmo residenciais [7].

Controlar pode ser definido como agir sobre uma variável de um processo de modo a fazer com que a mesma ou outra variável tenha como saída um valor desejado [7]. Por exemplo, deseja-se que a água em um reservatório se mantenha sempre a 50° C. A temperatura da água é a saída e o valor de 50° C é o valor de saída desejado. Para manter a água nessa temperatura, pode-se variar a potência de uma resistência elétrica ou o fluxo de gás queimado por uma chama que aquece o reservatório. Ou ainda o tempo que esta resistência ou chama devem ser

⁶ Disponível em: <<http://www.fernandesengenharia.com.br/noticias.php?data=07-2012>>. Acesso em 1 jul. 2017.

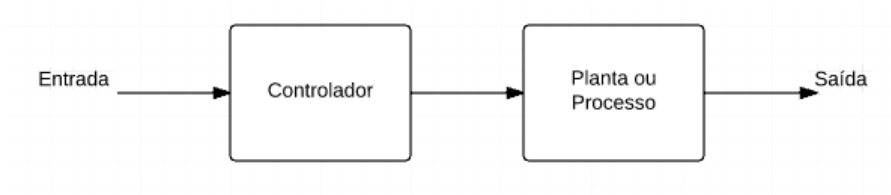
acionados. A potência, fluxo de gás ou tempo de aquecimento são as variáveis controladas no processo, visando manter a água nos 50° C desejados.

2.3.1. Malha aberta e malha fechada

Os sistemas podem ser definidos como de malha aberta ou malha fechada. No primeiro o controle é independente do sinal de saída. Ou seja, a saída não é medida e nem comparada a uma referência. Já no caso de malha fechada, existe uma retroalimentação. A saída é medida e é comparada com um referencial. A partir do erro, ou seja, a diferença entre as duas, o controlador atua sobre o processo, buscando sempre igualar a saída à referência [7].

Um sistema de malha aberta, como a da Figura 2.2, tem como vantagens a estabilidade. Porém ele só opera sob determinadas condições bem conhecidas de antemão e por isso depende de calibração. Distúrbios comprometem a saída. Por isso são usados quando as entradas são bem conhecidas antecipadamente no tempo e não há possibilidade de distúrbios. Além disso tendem a ser mais baratos e consumir menos energia que os sistemas de malha fechada [7].

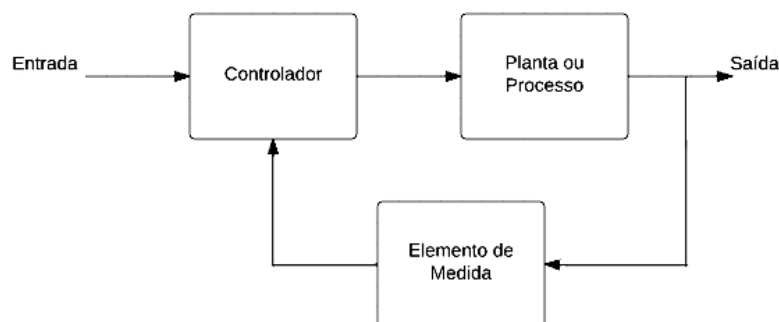
Figura 2.2 – Malha aberta.



Fonte: Autor deste documento.

Já um sistema de malha fechada, como o da Figura 2.3, tem como vantagem a relativa insensibilidade a distúrbios. Como o controle se adapta em função da saída, ele tende sempre a manter a saída em torno do esperado. Isto também permite usar componentes mais baratos e menos precisos.

Figura 2.3 – Malha fechada.



Fonte: Autor deste documento.

Porém o sistema como um todo tende a ser maior e mais caro que sistemas de malha aberta, além de consumir mais energia. Além disso, manter sua estabilidade é mais complicado [7].

Boa quantidade de aplicações utilizam ambos os sistemas juntos. São sistemas mistos onde parte do controle é feito com retroalimentação e parte sem ela. A união dos dois tipos de controle geralmente é menos dispendiosa e gera resultados satisfatórios [7].

O sistema de controle umidade de concretos proposto por este trabalho faz uso de ambos os tipos de malha. Parte do funcionamento será controlado por meio de tempos pré-definidos, o que caracteriza uma malha aberta. Outra parte usará retroalimentação, em especial controle do tipo *on/off*.

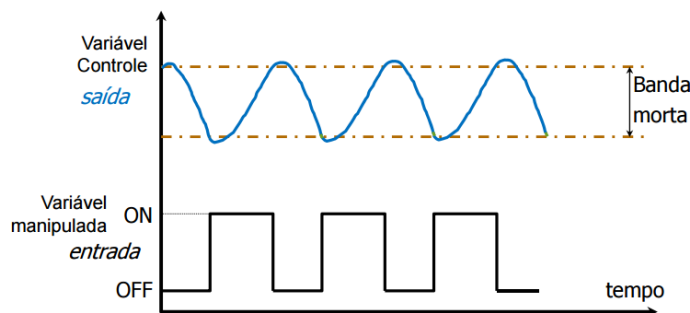
2.3.2. Controle *on/off*

Sendo o mais simples dos controladores, o controle *on/off* atua ligando ou desligando determinado elemento de modo a manter a saída aproximadamente igual ao valor desejado. É usado quando se permite uma variação da saída em torno do valor de referência. Esta variação pode ser maior ou menor, dependendo da histerese definida no projeto. Um controlador *on/off* sem histerese é possível, porém seria muito susceptível ao menor ruído e chavearia de modo espúrio, comprometendo muito a vida útil do equipamento. Assim, o valor de histerese é definido em função da precisão desejada, dos níveis de ruído existentes e a durabilidade dos componentes [7].

A vantagem desse sistema é sua simplicidade de projeto e manutenção e baixo custo. Sua desvantagem é a pouca estabilização da saída. Esta, na verdade, fica em qualquer ponto entre um valor mínimo e máximo. Seu uso se dá, portanto, em sistemas que não requerem suavidade no controle e nem uma grande precisão da saída. Em resumo, situações não críticas [7].

A Figura 2.4 mostra um sinal de saída típico de um sistema controlado dessa maneira. Note que o sinal de saída varia entre um limite superior e inferior. O atuador liga sempre que o limite inferior é atingido e desliga sempre que o limite superior é atingido.

Figura 2.4 – Funcionamento de um controle on/off ao longo do tempo.



Fonte: Controle – UFF⁷.

O presente projeto usa o controle *on/off* para manter a umidade no concreto. Quando a umidade no concreto cai abaixo do valor ideal, a válvula é acionada e flui água sobre o concreto. Podemos definir sua saída $u(t)$ como:

$$\begin{aligned} u(t) &= 1, \text{ se } e(t) < 0 \\ u(t) &= 0, \text{ se } e(t) > 0 \end{aligned}$$

Onde o erro $e(t) = \text{umidade medida} - \text{umidade desejada}$. A saída com valor 1 indica que a válvula é aberta e a água flui. A saída com valor 0 indica que a válvula é fechada e não há fluxo hidráulico.

O uso do controle *on/off* é possível nesse caso por dois motivos. O primeiro é que o controle de umidade não é crítico. Idealmente a umidade não pode cair do valor de referência, mas erros para cima não causam nenhum problema ao concreto, pelo contrário é benéfico que haja saturação da umidade relativa. O segundo é que a variação de umidade no concreto é lenta. Assim, mesmo com pouca histerese o chaveamento será pequeno.

2.4. Instrumentação

A referência [8] define a instrumentação como “o ramo da engenharia que trata do projeto, fabricação, especificação, montagem, operação e manutenção dos instrumentos para a medição, alarme, monitoração e controle das variáveis do processo industrial”.

Assim, sensores de umidade relativa e válvulas, dois itens indispensáveis neste projeto, são frutos dessa ciência da Instrumentação.

⁷ Disponível em: <http://www.professores.uff.br/controldeprocessos-eq/images/stories/Control_Aula08_-_Controle-FB_1sem2013.pdf>. Acesso em 11 jun. 2017.

2.4.1. Válvula solenoide

Para permitir ou interromper o fluxo de água no sistema de controle de umidade de concretos, o uso de válvulas do tipo solenoide (facilmente controladas com energia elétrica) é uma opção lógica e barata.

A referência [8] define bem o funcionamento e utilidade deste instrumento:

“A válvula solenoide é a combinação de duas unidades funcionais básicas a solenoide e a válvula. A válvula solenoide é usada para controlar a vazão de fluidos em tubulações, principalmente de modo digital (liga-desliga). Ela é aberta ou fechada pelo movimento do núcleo acionado na solenoide, quando a bobina é energizada”.

A Figura 2.5 traz a imagem de uma válvula solenoide. Em azul se vê a bobina, que quando energizada puxa um pistão interno que libera uma membrana e permite a passagem de água.

Figura 2.5 – Válvula solenoide.



Fonte: Emicol⁸.

Para a construção do protótipo, escolheu-se a válvula EVA 06, produzida pela Emicol. Este modelo de válvula é capaz de operar com pressões entre 0,2 à 8 kgf/cm². Sua vazão mínima nominal é, à 0,2kgf/cm², de 7 l/min; a máxima é, à 8 kgf/cm², de 40 l/min. Está à venda com bobinas de diversas tensões, inclusive 127 VAC e 12 VDC. Sua vida útil estimada é de 50 mil operações. A válvula da Figura 2.5 é a EVA 06.

2.4.2. Sensor de umidade relativa

A umidade relativa se refere à umidade total em relação a máxima umidade possível em determinada temperatura (saturação). Ou seja, uma atmosfera com umidade relativa de 100% está saturada de vapor de água naquela temperatura [8].

⁸ Disponível em: < <http://www.emicol.com.br/site/?l=1&p=produtoDetalhes&c=3&id=118> >. Acesso em 11 jun. 2017.

Há diversos tipos de instrumentos para medir a umidade relativa. Na classe dos dispositivos eletrônicos existem sensores que usam uma mudança na resistência ou capacitância em função da umidade para medi-la. No segundo caso, é necessário um circuito oscilador que muda a ressonância conforme a capacitância muda, sendo a saída, portanto, um sinal de frequência. Sensores digitais realizam essas medições sozinhos e já fornecem uma sequência de bits que representa o valor medido [8].

Para construção do protótipo, foram escolhidos dois modelos de sensores de umidade. O primeiro deles, para ser usado na câmara úmida, diretamente ligado por cabos à central, é o AM2302, produzido pela AOSONG. Este sensor permite usar cabos com até 20 m de comprimento (com projeto cuidadoso, esse limite aumenta). Abaixo lista-se algumas de suas características [9]:

- Tensão de trabalho de 3,3 a 6 V;
- Precisão típica de $\pm 2\%$ para umidade relativa e $\pm 0,5$ °C para temperatura;
- Interface single-bus (One Wire);
- Operação de 0 a 99,9% de umidade relativa e -40 a 80 °C.

O segundo, para ser usado nas estruturas finais, que se comunicará com a central via rádio, é o HDC1080, produzido pela Texas Instruments. A escolha foi baseada nas características desse sensor, algumas delas discriminadas a seguir [10]:

- Tensão de trabalho de 2,7 a 5,5 V.
- Tamanho de 3 x 3 mm, adequado para ser inserido dentro de furos no concreto;
- Interface com o microcontrolador por meio de I²C;
- Precisão típica de $\pm 2\%$ para umidade relativa e $\pm 0,2$ °C para temperatura;
- Faixa de operação de 0 a 100% de umidade relativa e -40 a 125 °C.

2.5. Micro controladores

Micro controladores são circuitos integrados capazes de fazer operações lógicas e matemáticas, usando lógica binária. É um computador em um chip. Além de um núcleo de processamento, estes dispositivos contam com memória integrada, para guardar o algoritmo e para guardar variáveis durante o tempo de execução, e portas usadas para entrar e ou sair com dados. Frequentemente é integrado também periféricos como conversores analógico-digital, saídas PWM, comparadores, etc. O sinal de *clock* muitas das vezes é gerado por um oscilador interno, mas também é muito comum que seja necessário um cristal de quartzo externo[11].

São usados em larga escala em todos os tipos de equipamentos, de domésticos a industriais e hospitalares, devido ao baixo custo, versatilidade e baixo consumo de energia [11].

A maior vantagem, no entanto, é a possibilidade de gravação e regravação de algoritmos. Operações complexas que necessitariam de grandes circuitos podem ser implementadas via *software* e a possibilidade de entrar e sair com informações faz com que processos de controle possam ser implementados nesses dispositivos, pelo menos no que se refere a tomadas de decisões e operações matemáticas, ficando a cargo de circuitos externos a parte de sensoriamento e atuação no processo [11].

Devido a estas características, e também às necessidades do projeto, o uso de micro controladores na construção do protótipo proposto se mostra altamente vantajoso.

2.6. Considerações Finais

Neste capítulo buscou-se enumerar a bibliografia básica a ser usada no prosseguimento deste trabalho.

De modo resumido e superficial, buscou-se apresentar alguns conceitos e dispositivos que serão usados no projeto e construção do protótipo.

A cura do concreto consiste em manter a umidade no material durante determinado período de tempo a fim de garantir uma correta e suficiente hidratação do concreto. Esta hidratação é imprescindível para que as reações químicas que endurecem o concreto ocorram. O modo mais simples de garantir essa hidratação é manter molhada a superfície.

O processo de controle de uma planta ou sistema qualquer pode ser por malha aberta, onde o processo de atuação independe da saída; por malha fechada, onde o processo é retroalimentado, isto é, o sinal de saída interfere na atuação, de modo a se obter a menor diferença possível do valor desejado; e os sistemas mistos, maioria, que usam os dois tipos de malha em seus subsistemas. Dentre os tipo de controle de malha fechada, o mais simples é o controle *on/off*, quando o atuador liga ou desliga em função do sinal de saída.

A instrumentação é um ramo vasto da engenharia que trata dos instrumentos e sua utilização. Para o projeto proposto, é logo definida a necessidade de sensores de umidade, capazes de medir a umidade relativa do ar; e válvulas solenoides, para permitir ou bloquear a passagem de água pelas tubulações que levam água até o concreto que deve ser curado.

CAPÍTULO III - LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

3.1. Considerações Iniciais

O desenvolvimento de um protótipo requer os requisitos mínimos que ele precisa cumprir para exercer corretamente a função para o qual foi desenvolvido. Nesta sessão serão levantados esses requisitos.

Há também uma questão importante a ser considerada, e que define os rumos do projeto: deseja-se um sistema versátil, que tanto possa ser utilizado para controlar a umidade dentro de uma câmara úmida, usada para curar corpos-de-prova; quanto possa ser utilizado em estruturas finais (pisos, lajes etc.).

É certo que na prática são situações bastante distintas, que normalmente não são usadas em conjunto no mesmo local, uma vez que se trata de um ambiente de laboratório ou industrial em um caso e um ambiente de obras no outro. Assim sendo, numa eventual produção e comercialização de tal sistema, um equipamento diferente para cada situação talvez seja mais vantajoso. No caso deste trabalho, como se trata de um protótipo desenvolvido com fins de pesquisa, um sistema versátil pareceu mais adequado.

3.2. Umidade ideal do concreto durante a cura e requerimentos da câmara úmida

No caso de corpos-de-prova curados em câmara úmida, as normas técnicas NBR 5738 [2] e NBR 9479 [3] estipulam que a umidade relativa do ar dentro da câmara deve ser maior ou igual a 95%. As mesmas normas estipulam, também, as faixas de temperatura em que os corpos de prova devem permanecer, sendo o padrão $23(\pm 2)$ °C, mas também se aceitando, desde que devidamente registrado nos relatórios, $21(\pm 2)$ °C, $25(\pm 2)$ °C e $27(\pm 2)$ °C.

Para estruturas de concreto finais, a referência [12] estipula uma umidade relativa interna de no mínimo 80% a 85% para que a cura ocorra satisfatoriamente. A referência [13] corrobora este dado, estipulando que a umidade do concreto deve ser de pelo menos 80% ao menos nos sete primeiros dias.

3.3. Interface

É necessário que o sistema tenha uma interface com o usuário, que permita configurar o sistema e exibir informações sobre o estado do processo. Por isso uma tela LCD será necessária, assim como botões.

Pelo menos duas informações devem ser exibidas continuamente na tela: tempo restante até o fim da cura e umidade atual.

A utilização deve ser o mais fácil e intuitivo possível.

3.4. Robustez contra ruído e quedas de energia

O ambiente de obra — por utilizar diversas ferramentas elétricas de características indutivas, normalmente com potência relativamente alta — pode ser muito ruidoso [8]. Assim, o sistema deve ser imune a esse ruído, para evitar falhas.

Por ser um sistema que será utilizado continuamente por diversos dias (o tempo necessário para a cura, estipulado pelo engenheiro civil responsável), com pouca ou nenhuma supervisão humana, é imprescindível que o sistema seja capaz de lidar com quedas de energia sem que isso afete as configurações realizadas inicialmente, bem como preservar o tempo de contagem restante até o fim do processo de cura. Ou seja, ao haver uma queda de energia elétrica, o sistema deve continuar trabalhando normalmente, em sua totalidade ou ao menos a parte responsável por guardar os dados de configuração, através de uma bateria.

3.5. Desligamento automático

O sistema deve desativar-se assim que o tempo de cura definido pelo engenheiro civil responsável for atingido. Isto evita que se continue a usar água para hidratar o concreto. Neste momento, a tela de interface deve começar a exibir essa informação de que a cura está completa e o equipamento pode ser removido.

3.6. Custos e disponibilidade de peças

Deve-se buscar o menor custo possível, bem como priorizarem-se peças, mecanismos e componentes disponíveis no mercado nacional. Também deve-se sempre procurar o menor custo possível, mantendo, porém, a qualidade, confiabilidade e funcionalidade do protótipo.

3.7. Disposição dos sensores

A princípio, a disposição e número de sensores no caso de lajes e pisos vai seguir a recomendação da ASTM F2170 [14]. Esta norma técnica é usada para descrever os procedimentos para medição da umidade de lajes de concreto através de sensores invasivos (que entram no concreto por meio de um furo).

Tal norma é voltada para a medição de umidade em concretos já curados, principalmente como etapa precedente à cobertura com tintas, cerâmicas, azulejos, etc., uma vez que esse

procedimento não pode ser realizado com o concreto demasiadamente úmido, sob o risco de problemas futuros surgirem. Tal norma não prevê a medição durante a cura, tampouco para fim de controle de umidade. Mas como em ambos os casos o objetivo é o mesmo, isto é, medir umidade de uma laje ou piso, parece razoável seguir suas recomendações.

No entanto, um estudo futuro, direcionado a essa otimização da disposição de sensores no concreto, é bem-vindo; sobretudo se os resultados obtidos usando a norma não forem bons. Em tempo, a norma estipula:

- Três sensores para os primeiros 100 m²;
- Um sensor para cada 100 m² extras.
- Distribuir estes sensores de modo que indiquem bem o estado de umidade geral da laje ou piso, sendo que se este for no nível ou abaixo do nível do solo, deve haver um sensor em até 1 m de cada parede externa.

3.8. Considerações finais

Neste capítulo buscou-se definir quais os requisitos de projeto deverão ser atendidos de modo a se obter um resultado satisfatório.

As normas técnicas brasileiras exigem uma umidade relativa mínima de 95% dentro das câmaras úmidas usadas para a cura de corpos de prova. Nas referências consultadas recomenda-se que em estruturas finais, a umidade relativa no interior do concreto deve ser de no mínimo 80% durante toda a cura.

Para correto funcionamento, é necessário que haja uma interface entre o usuário e o sistema. Para isso serão usados um *display* e alguns botões. A tela deve ser capaz de exibir a umidade atual de cada sensor, bem como o tempo restante de cura. A interface deve ser intuitiva e simples de entender e usar.

Devido ao ambiente ruidoso e à volatilidade de dados da memória de trabalho, o equipamento deve ser relativamente imune a ruídos bem como possuir um sistema de baterias que permite manter o sistema por algumas horas em caso de piques ou quedas de energia.

A cura deve ser interrompida automaticamente quando o tempo de cura definido pelo engenheiro civil for atingido.

Deve-se perseguir um baixo custo de materiais para o protótipo.

A disposição e quantidade de sensores por área concretada já é definida por uma norma internacional. Deve-se avaliar sua pertinência, uma vez que a citada norma define essa disposição e quantidade de sensores para a medição da umidade, somente, e não para curar concretos de modo automatizado.

CAPÍTULO IV - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordadas as etapas realizadas para o desenvolvimento do projeto do protótipo e sua posterior execução. Isto inclui a discriminação de componentes e módulos usados, projetos elétricos, protocolos de comunicação, estruturas de dados e algoritmos usados no desenvolvimento do *software*.

4.2. Peças e módulos utilizados

4.2.1. Atuadores

Na Seção 2.4.1 já foi descrito o modelo de válvula solenoide escolhido para ser o atuador do projeto, o modelo EVA 06, bem como suas especificações. Tal válvula atende bem às necessidades do protótipo e é facilmente encontrada no mercado, uma vez que é produzida por uma empresa brasileira e usada como componente de máquinas de lavar roupas e tanquinhos de diversas marcas que fabricam no país. Tal válvula foi encontrada numa loja de peças de reposição de eletrodomésticos da cidade de Patos de Minas e seu preço unitário foi de R\$ 22,90 na data da compra, para a versão de 127 V.

4.2.2. Sensores

Na Seção 2.4.2 foi descrito os dois modelos de sensor de umidade escolhidos. Um deles para ser usado nos sensores inseríveis, usados para curar estruturas de concreto (como lajes e pisos) e outro para ser usado na câmara úmida.

O primeiro, o HDC1080, cujas especificações [10] já foram discriminadas na referida seção, e mostrado na Figura 4.1, teve sua escolha baseada principalmente em suas dimensões físicas, já que teria de ser montado na ponta de uma sonda cilíndrica a ser inserida num furo de diâmetro máximo de 20 mm, conforme exigência da norma técnica [14]. Além disso, atende aos outros requisitos e a aquisição da dados feita por meio do protocolo I²C e a alimentação de 3,3 V facilita seu uso com o modelo de microcontrolador previamente escolhido, uma vez que há compatibilidade elétrica entre eles. É uma peça do protótipo que diretamente importada, tendo sido uma doação do fabricante, que adota uma política de amostras grátis para empresas e universidades interessadas em testar e/ou desenvolver projetos com seus componentes. Na loja online da fabricante, a Texas Instruments, também é possível comprar o sensor ou localizar

vendedores autorizados (nenhum no Brasil), a partir de US\$ 3,02 cada (o preço diminui gradualmente a medida que se aumenta a quantidade comprada).

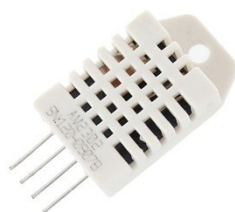
Figura 4.1 - Sensor de umidade e temperatura HDC1080.



Fonte: Texas Instruments⁹.

O segundo sensor, o AM2302 [9], também já especificado na seção 2.4.2, e exibido na Figura 4.2, é utilizado exclusivamente na câmara úmida. Sua escolha se deve ao fácil acesso para compra, a compatibilidade elétrica com o microcontrolador escolhido, a suas especificações que atendem à necessidade e ao encapsulamento plástico externo que o torna ideal para instalação no ambiente de uma câmara úmida. Pode ser facilmente encontrado em lojas online do Brasil a partir de R\$ 15,00 cada.

Figura 4.2 - Sensor de umidade AM2302



Fonte: FilipeFlop¹⁰.

4.2.3. Microcontrolador

Por ser de baixo preço, confiável, facilmente encontrado para compra, compacto, de baixo gasto energético e produzido por uma indústria de renome, a Texas Instruments, o microcontrolador escolhido para dar prosseguimento ao protótipo é o MSP430G2553. No entanto, outros microcontroladores poderiam ser usados, apenas adequando o *hardware* e *software* do protótipo para um novo CI.

O datasheet [15] traz diversas informações relevantes, que deverão ser consultadas mais tarde. Porém segue algumas das mais básicas:

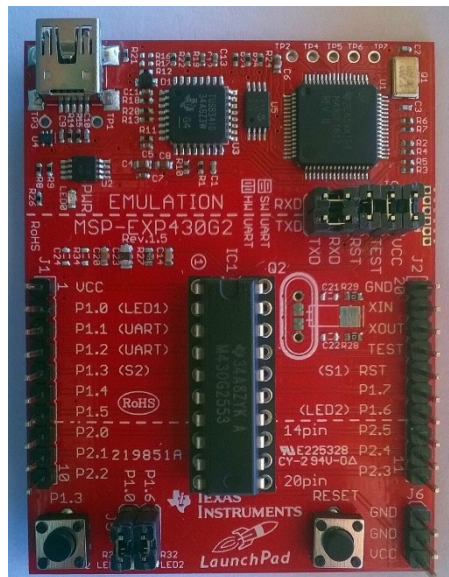
⁹ Disponível em: <<http://www.ti.com/product/HDC1080/description>>. Acesso em 15 out. 2017.

¹⁰ <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22/>

- Tensão de trabalho de 1,8 a 3,6 V (valor máximo absoluto é 4,1 V);
- Arquitetura RISC de 16 bits;
- SPI, I²C, UART e IrDA;
- Conversor analógico-digital de 10-Bit e 200-kSPS;
- Duas portas com capacidade de interrupção (16 I/O);
- *Clock* 16 MHz;
- 16 KB memória flash e 512 B de memória RAM;
- Encapsulamento DIP 20.

Estes chips usados no protótipo também foram doação da fabricante, importados junto aos sensores HDC1080. No entanto, os chips podem ser adquiridos no Brasil. Em lojas online, foram encontrados a partir de R\$20. Seu preço na loja online da Texas Instruments é a partir de US\$2,41 (maiores quantidades diminui o preço unitário). A placa programadora o autor já possuía, tendo sido importada, na época, por US\$9,99. A Figura 4.3 exibe o circuito integrado na opção de encapsulamento PDIP, instalado na placa programadora cujo nome comercial é LaunchPad.

Figura 4.3 – MSP430G2553 e LaunchPad.



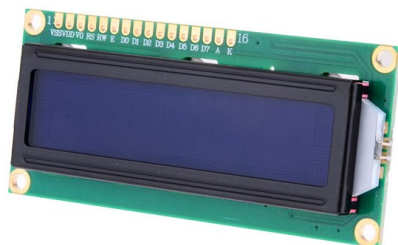
Fonte: Fotografia tirada pela autor.

4.2.4. Interface

Como as informações a serem exibidas para o usuário são poucas, um visor de 16 colunas por 2 linhas é o suficiente. Sendo assim, escolheu-se o QC1602, por ser um *display* de baixo preço, amplamente conhecido e comercializado, com bibliotecas de uso livre disponíveis para si. O *display* é facilmente encontrado em lojas online, com preços, em média, de R\$10,00

a R\$16,00. O exemplar usado no protótipo foi adquirido de um amigo que compra e revende, por R\$10,00. É exibido na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Display QC1602.



Fonte: FilipeFlop¹¹.

Quanto aos comandos, haverá dois botões tipo *push*. Um botão será usado para pausar o sistema, o outro será para modificar as informação a serem exibidas na tela. Porém, antes do sistema começar o processo de monitoramento e controle, ele deve ser configurado. Nessa etapa os dois botões terão funções distintas das mencionadas anteriormente. Servirão para avançar as configurações e alterar os parâmetros. As ações serão realizadas por meio de interrupção.

4.2.5. Transceptores

Como visto anteriormente, definiu-se que o mais adequado seria o uso de comunicação sem fio entre os sensores das estruturas finais (os que serão instalados em lajes e pisos), uma vez que estes sensores ficam espaçados entre si e relativamente distantes da central de controle, tornando o uso de cabos dispendioso e inadequado.

Levando em consideração que os sensores serão alimentados por bateria, o baixo consumo energético é imprescindível. Além disso, é desejável uma tensão de trabalho igual à do microcontrolador e do sensor, de 3,3 V, o que facilita o projeto de alimentação e evita diferenças entre níveis lógicos, o que precisaria ser corrigido por componentes extras.

Diante desses requerimentos, encontrou-se como melhor alternativa o circuito integrado nRF24L01+, da Nordic Semiconductor. Neste projeto, mais especificamente, foi usado um módulo baseado nesse chip. O uso do módulo dispensa a confecção de circuitos impressos de precisão, que o autor não teria meios de confeccionar por falta de ferramentas adequadas, uma vez que este CI tem um encapsulamento SMD bastante reduzido. Tal módulo, no entanto, simplesmente abriga o nRF24L01+ juntamente a um cristal oscilador, uma pequena antena desenhada na própria trilha da placa e alguns resistores e capacitores SMD e os pinos para conexão, como se pode observar na Figura 4.5.

¹¹ <https://www.filipeflop.com/produto/display-lcd-16x2-backlight-azul/>

Figura 4.5 – Módulo transceptor nRF24l01+.



Fonte: BuildBot¹²

Tal módulo é facilmente encontrado no mercado nacional a um custo bastante reduzido. O exemplar usado no protótipo foi adquirido de um amigo que compra e revende, por R\$6,00. Além disso, tem as seguintes características [16], que o fazem uma boa escolha para o projeto:

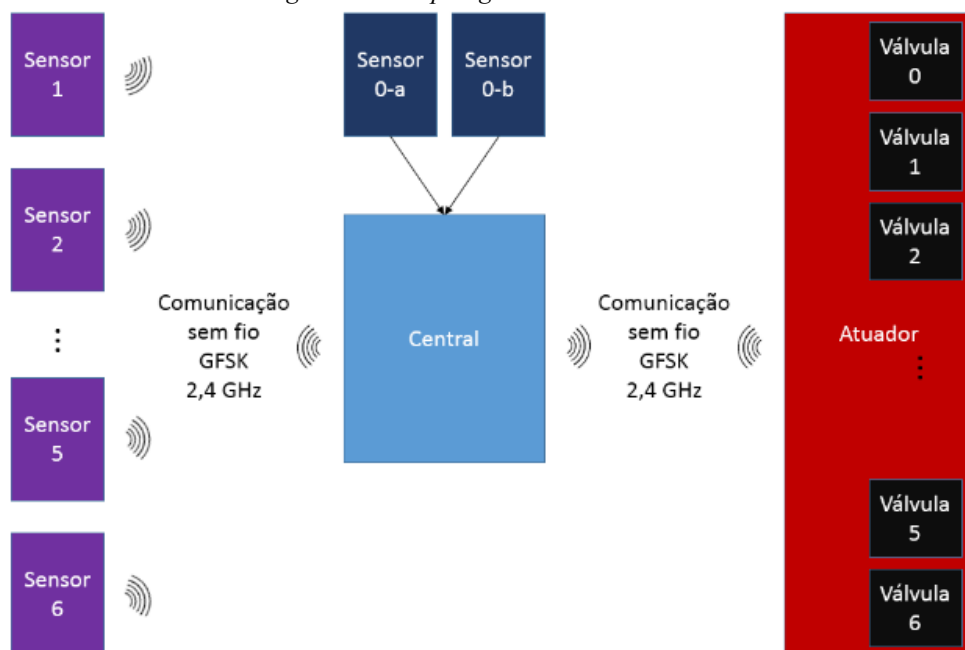
- Operação com alimentação entre 1,9 V e 3,6 V, idêntica à do microcontrolador;
- Operação na faixa livre de 2,4 GHz;
- Operação “*Ultra low power*”, ou seja, com baixo consumo energético;
- Taxa de transmissão de 250kbps, 1Mbps ou 2 Mbps;
- Transmissão com potência de até 0 dBm;
- Operação em 125 canais distintos;
- Modulação GFSK;
- Endereçamento de pacotes de até 5 bytes;
- CRC de até 16 bits integrado, sendo que o pacote é automaticamente descartado caso haja detecção de erros;
- Protocolo interno para retransmissão de pacotes perdidos;
- Controle por interface SPI.

4.3. Topologias e diagramas de blocos

O sistema propõe uma topologia centralizada, onde uma central toma decisões. A central também é usada para configurar o sistema e obter informações sobre o processo, que são exibidas ao operador. A Figura 4.6 ilustra essa topologia, que além da central conta com sensores e um conjunto de atuadores, que são as válvulas solenoides.

¹² <http://buildbot.com.br/blog/comunicacao-wireless-com-o-modulo-nrf24l01/>

Figura 4.6 – Topologia do sistema.



Fonte: Autor deste documento.

Nesta topologia, uma central recebe via rádio frequência, numa modulação GFSK, leituras dos sensores posicionados sobre o piso ou laje que se deseja curar, no caso de um uso com estruturas finais (sensores 1 a 6). O uso de sensores sem fio é imprescindível, uma vez que os custos e a dificuldade de espalhar cabos pela obra conectando os sensores à central seriam impeditivos e pouco práticos. No caso do sistema ser utilizado para controlar umidade de uma câmara úmida, por outro lado, a informação é recebida via cabo, proveniente de dois sensores posicionados no interior da câmara (sensores 0-a e 0-b). O protótipo desenvolvido usa um algoritmo que permite que ele também possa ser usado para as duas atividades ao mesmo tempo, isto é, pode ser usado na câmara úmida e para curar estruturas finais simultaneamente.

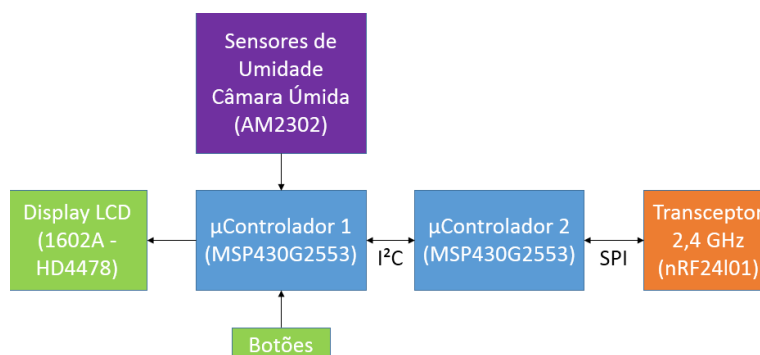
Na central, estas informações de umidade e temperatura provenientes dos sensores são processadas e exibidas no *display*, para que o operador possa acompanhar essas grandezas.

A central também se comunica com um subsistema de válvulas solenoides, que são os atuadores do processo, responsáveis por interromper ou iniciar o fluxo de água sobre o concreto que deve ser curado ou para os aspersores da câmara úmida.

Tais válvulas são conectadas a uma fonte de água, e suas saídas são ligadas a mangueiras que levam a água até o concreto que será curado. São sete válvulas, numeradas de 0 a 6, e correspondem aos sensores de mesmo número. Isto é, a válvula 0 é usada pela câmara úmida enquanto as válvulas 1 a 6 são usadas para molhar a região em que se encontra o sensor de número correspondente.

A central, por sua vez, é composta pelos blocos de processamento (dois microcontroladores que se comunicam entre si), um módulo transceptor GFSK, *display*, botões e sensores de umidade da câmara úmida. A Figura 4.7 traz esse diagrama. As setas indicam o sentido de fluxo das informações; note que há uso do protocolo SPI entre o módulo transceptor e um dos microcontroladores, e uso do protocolo I²C entre os dois microcontroladores.

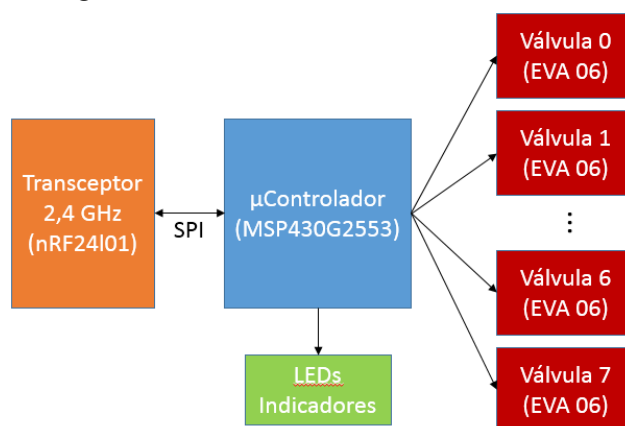
Figura 4.7 – Estrutura da central.



Fonte: Autor desde documento.

O subsistema de válvulas também recebe os comandos provenientes da central via rádio. Assim, ele é formado por um módulo transceptor GFSK, um microcontrolador, pelas sete válvulas e dois *LEDs* indicadores. A Figura 4.8 detalha esses componentes.

Figura 4.8 – Estrutura do subsistema de válvulas.

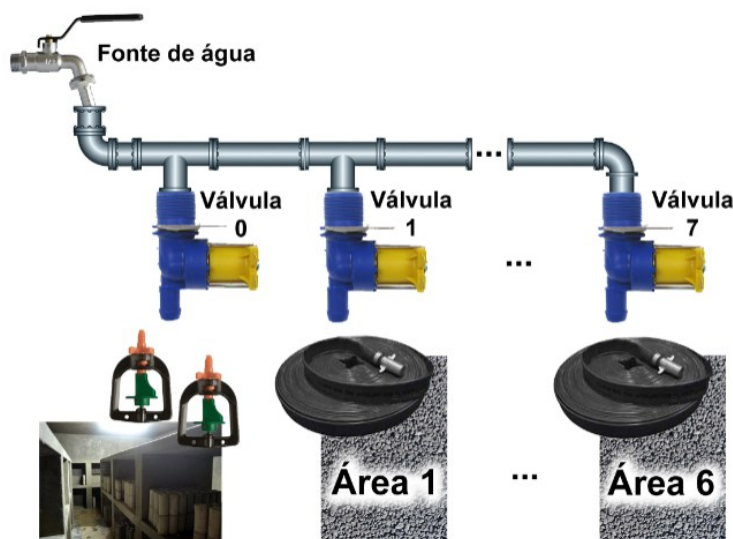


Fonte: Autor deste documento.

Já na Figura 4.9 é mostrado um diagrama das conexões hidráulicas usadas no subsistema de válvulas. Uma fonte de água é conectada a um ramo de válvulas. A válvula 0 é conectada à aspersores posicionados na câmara úmida, enquanto as válvulas 1 a 6 são conectadas a mangueiras perfuradas de irrigação que molham uma área específica, correspondente ao sensor. Não é necessário que as seis válvulas (isto é, seis áreas de cura) sejam utilizadas ao mesmo tempo. É possível usar apenas uma ou apenas algumas delas. Basta manter desligados os sensores correspondentes às válvulas que não serão usadas. E como já mencionado, pode-se

usar o sistema apenas para controlar a umidade da câmara úmida, apenas de estruturas de concreto ou ambos simultaneamente.

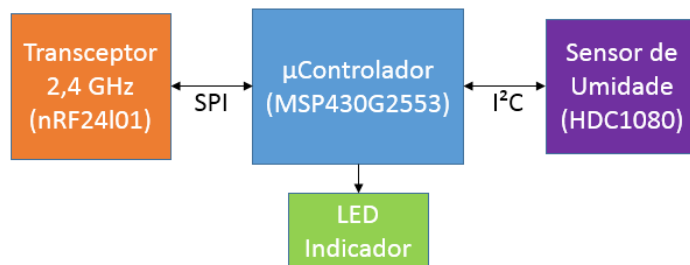
Figura 4.9 – Hidráulica do projeto.



Fonte: Autor desde documento.

Os sensores usados nas estruturas finais, inseríveis, na verdade também são subsistemas, uma vez que, além do sensor em si, cada um deles conta com um microcontrolador, um *LED* indicador e um módulo transceptor GFSK. O diagrama está na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Estrutura dos sensores inseríveis



Fonte: Autor desde documento.

4.4. Diagramas elétricos

4.4.1. Diagrama elétrico da central

Na Figura 4.11 o diagrama elétrico da central é mostrado na íntegra. Observa-se que o sistema é alimentado por uma fonte de tensão proveniente de um adaptador AC-DC e possui baterias que, devido ao uso de um diodo, só fornecem energia quando a fonte de tensão externa é interrompida.

Há ainda dois reguladores de tensão, que fornecem uma alimentação estável de 5 V e 3,3 V. São, respectivamente, o 7805 (U1) e o LM1085 - 3.3 (U3). A tensão de 5 V é usada pelo

módulo LCD (U2), enquanto a de 3,3 V é usada pelos microcontroladores (U4 e U5), o transceptor (U6) e ainda pelos sensores de umidade AM2302 (U7 e U8). O protótipo em si, apesar de não mostrado no diagrama, possui um conector do tipo DB09 fêmea, ao qual se acopla, quando usado na câmara úmida, um cabo com os sensores AM2302. Objetivo dos conectores é puramente tornar mais prática a tarefa de conectar ou desconectar os sensores à central, uma vez que nem sempre são necessários.

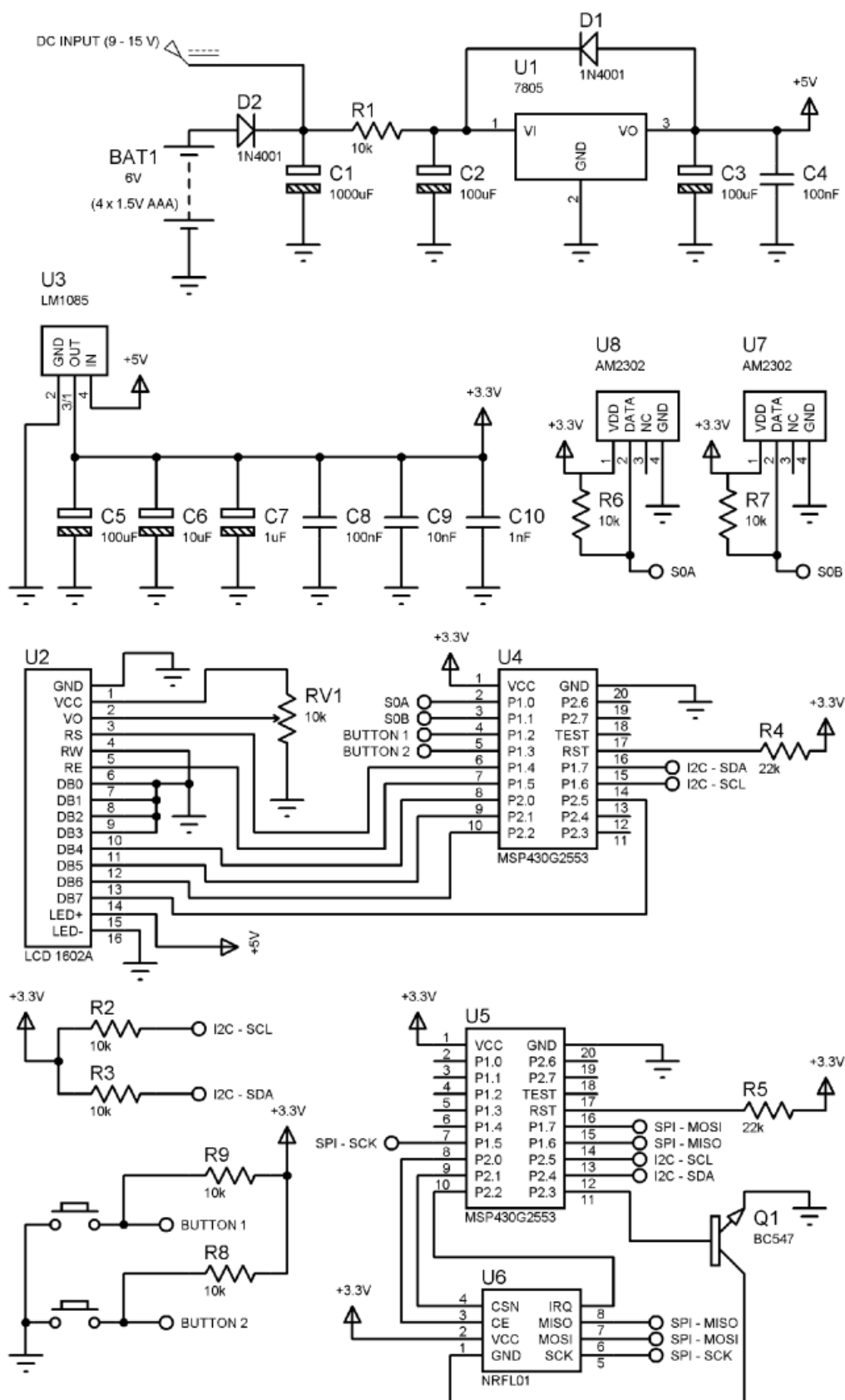
Ainda no bloco de alimentação é possível ver a presença de capacitores de diferentes valores de capacitância conectados em paralelo. O objetivo é filtrar o máximo de ruídos possível da alimentação, em várias faixas de frequência. Isto é primordial para o correto funcionamento de qualquer sistema eletrônico, sobretudo microcontrolado, uma vez que ruídos podem ocasionar travamentos no processador [11].

Há dois barramentos de comunicação serial, um I²C e um SPI. O primeiro é usado para a comunicação entre os dois microcontroladores e o segundo entre um dos microcontroladores e o módulo transceptor. Conforme exigências do protocolo, o barramento I²C apresenta resistores *pull-up* (R2 e R3).

O microcontrolador U4 é responsável por realizar a leitura dos sensores da câmara úmida, exibir e manter atualizadas as informações do *display* LCD, tratar as interrupções geradas pelos botões e comparar as entradas (leituras de umidade) com os valores de referência (umidade desejada que deve ser mantida).

O microcontrolador U5, por sua vez, é responsável por receber informações dos sensores sem fio e repassá-las ao U4, receber comandos do U4 e transmiti-los ao subsistema de válvulas (controlar o transceptor, em resumo), controlar a validade dos dados recebidos pelos sensores sem fio (dados antigos expiram após algum tempo, caso não sejam substituídos por novos), garantir a comunicação da central com as válvulas e checar a validade dos dados recebidos.

O transistor Q1 atua como chave e permite ligar e desligar a alimentação do transceptor. Os resistores *pull-up* R4 e R5 mantém o pino de reset em nível alto, o que é necessário para o funcionamento do microcontrolador (o reset é ativo-baixo) e o potenciômetro RV1 permite regular o contraste do LCD.



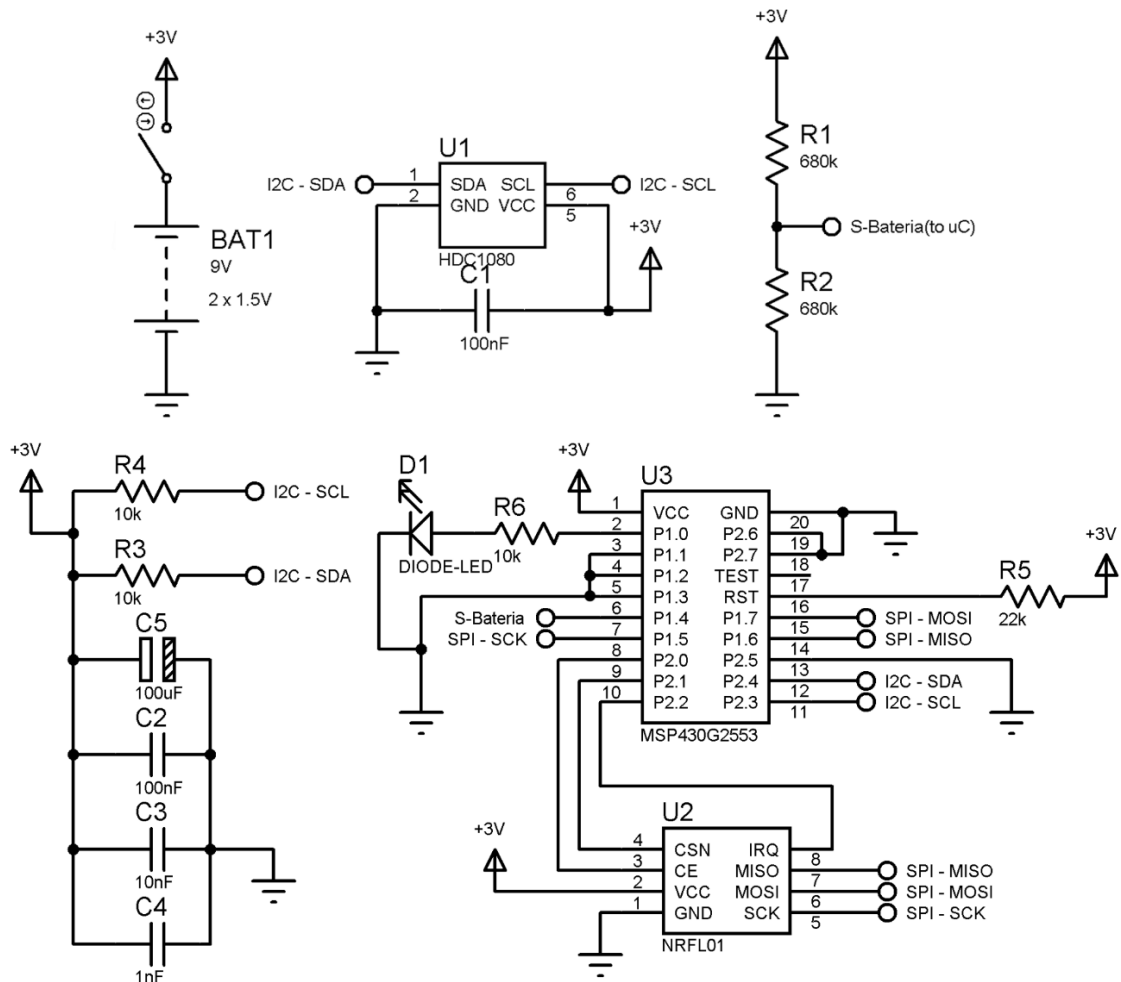
Fonte: Autor desde documento.

4.4.2. Diagrama elétrico dos sensores sem fio

O diagrama elétrico dos sensores sem fio para estruturas finais é bastante semelhante ao diagrama da central, uma vez que é o mesmo modelo de microcontrolador e transceptor, no entanto há somente um microcontrolador e a alimentação se dá exclusivamente através de duas baterias AA. O divisor de tensão formado por R1 e R2 serve para monitorar o nível das baterias, já que é conectado a um conversor AD do microcontrolador. U1 é o sensor de umidade HDC1080 e se comunica com o restante do circuito por cabos que sobem a haste inserível da sonda. O sensor usa um barramento I²C para se comunicar com o microcontrolador.

Há ainda um *LED* indicador e uma chave mecânica que liga ou desliga o sensor atuando diretamente na alimentação de todo o circuito. A Figura 4.12 mostra o circuito na íntegra.

Figura 4.12 – Diagrama elétrico dos sensores em fio.

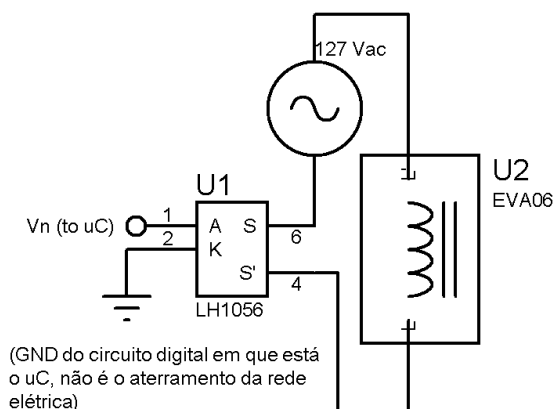


Fonte: Autor deste documento.

4.4.3. Diagrama elétrico do sistema de válvulas

O diagrama elétrico do subsistema de válvulas, por ser baseado no mesmo microcontrolador e transceptor, segue a mesma lógica do diagrama dos sensores sem fio da figura 4.12, incluindo a presença de um bloco de alimentação semelhante à da central, porém com apenas o regulador de 3,3 V e sem a presença de sensores, barramento I²C ou um divisor de tensão para monitoramento da bateria. Em vez disso, sete relés de estado sólido são conectados ao microcontrolador e fazem a interface entre o circuito lógico e as válvulas. O relé é o LH1056, que é um relé opto acoplador e que suporta a corrente exigida pelas válvulas. Entre o microcontrolador e o relé deve ser usado um resistor de 1 k Ω para limitar a corrente no emissor de luz interno do relé. Cada válvula requer um relé para si. O detalhe do circuito mostrando a ligação elétrica de uma das válvulas e seu respectivo relé é mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Esquema ligação válvulas solenoides e relé de estado sólido.



Fonte: Autor deste documento.

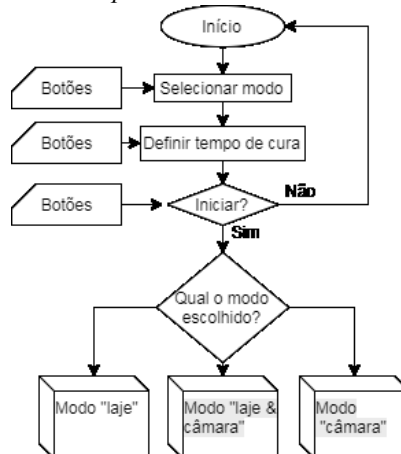
4.5. Algoritmos

Todos os códigos do sistema, de suas várias partes, são relativamente extensos e complexos. Nesta seção não se pretende esgotar uma discussão sobre eles. Longe disso, busca apenas apresentar os esqueletos básicos por meio de fluxogramas. Diversas são as funções e iterações por trás de cada etapa dos algoritmos apresentados, assim como várias etapas tidas como secundárias ou muito específicas foram omitidas dos fluxogramas. Há ainda diversas bibliotecas em uso, que implementam os protocolos de comunicação, e outras que implementam as funções necessárias para funcionamento dos sensores, transceptores e *display*. Outra consideração importante é que a central é composta por dois microcontroladores que se comunicam entre si. Cada um possui um código próprio e executa tarefas próprias, tendo, portanto, um algoritmo próprio.

4.5.1. Algoritmos da central

Quando o sistema é ligado, ele solicita do operador uma configuração inicial, que consiste em definir o modo de operação (se o sistema será usado numa câmara úmida, numa estrutura final (laje) ou ambos). Estas configurações são feitas por meio dos botões e da tela. A Figura 4.14 apresenta um fluxograma simplificado dessa etapa.

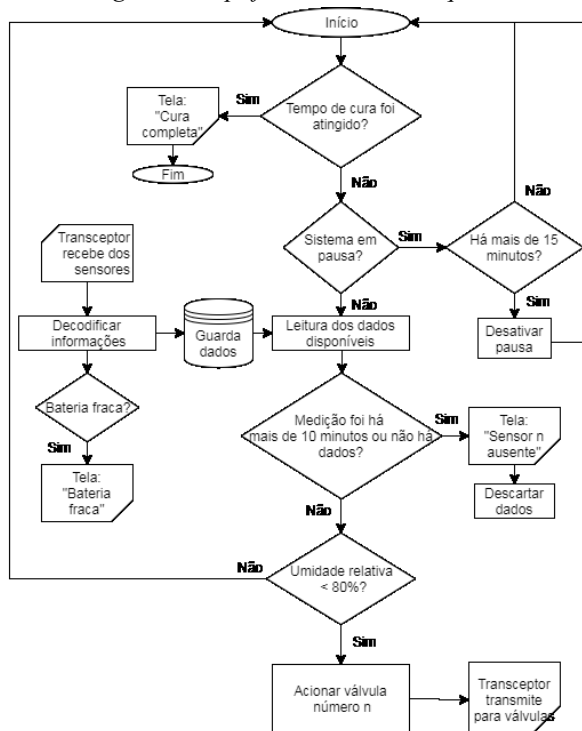
Figura 4.14 – Algoritmo simplificado da central, ênfase na etapa de configuração do sistema pelo operador/usuário.



Fonte: Autor deste documento.

Como se pode observar, o algoritmo restante a ser executado da central depende do modo selecionado. A Figura 4.15 traz o algoritmo para o modo “laje”.

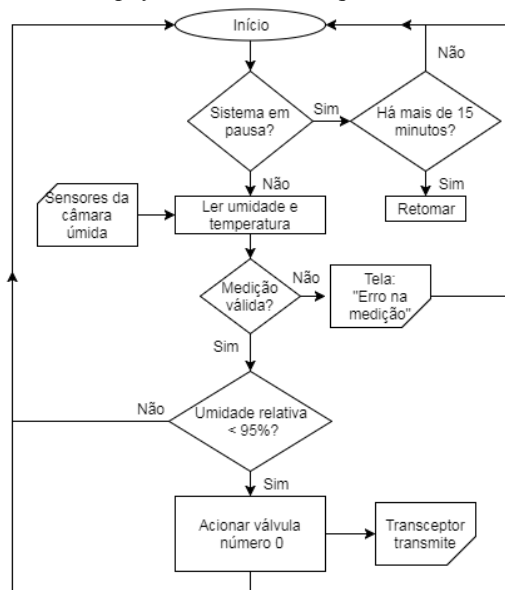
Figura 4.15 – Fluxograma simplificado da central quando no modo “laje”.



Fonte: Autor deste documento.

A Figura 4.16, por sua vez, traz o algoritmo para o modo “câmara”.

Figura 4.16 – Algoritmo simplificado da central quando no modo “câmara”.



Fonte: Autor deste documento.

O modo “Laje e câmara” é um misto dos dois algoritmos anteriores, executando-os simultaneamente, com poucas adaptações.

Em ambos os casos, o que se deve observar é que depois de definido um modo de operação, o sistema passa a executar indefinidamente uma rotina de tarefas que consiste basicamente em comparar a umidade medida pelos sensores à umidade de referência. Caso a umidade medida seja menor que a desejada, a central envia às válvulas um sinal para que sejam abertas. Cada sensor é atrelado a uma válvula específica, e somente a válvula respectiva à área atendida pelo sensor é aberta.

Outro ponto a ser considerado é que o sistema pode ser pausado pelo usuário (para evitar o acionamento da água durante alguma tarefa no local, por exemplo) e que caso a pausa não seja interrompida manualmente em até quinze minutos, o sistema retorna sozinho à atividade, evitando que o sistema seja mantido inativo por descuido e comprometa a cura.

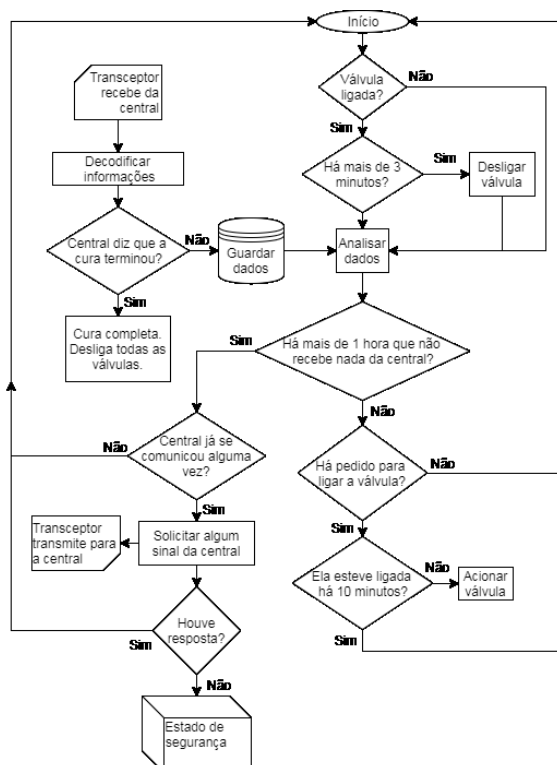
Quando o tempo de cura definido na configuração inicial é atingido, o sistema interrompe a cura e deixa de molhar o concreto mesmo que a umidade caia abaixo da desejada.

4.5.2. Algoritmo das válvulas

As válvulas recebem da central, sempre que a central detecta uma umidade abaixo do esperado, uma sequência de *bytes* que são interpretados. São estes *bytes* que indicam qual ou quais válvulas devem ser acionadas. Uma vez que uma válvula é acionada, ela permanece assim por três minutos, depois é desligada. Se houver novo pedido dentro de dez minutos, a válvula

não é religada. Este tempo de espera visa garantir que a unidade dentro da câmara ou sobre a laje estabilizou-se um pouco após o último acionamento. Caso o último acionamento tenha sido há mais tempo, a válvula é religada normalmente, por mais três minutos. O algoritmo simplificado pode ser visto na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Fluxograma simplificado do subsistema de válvulas.



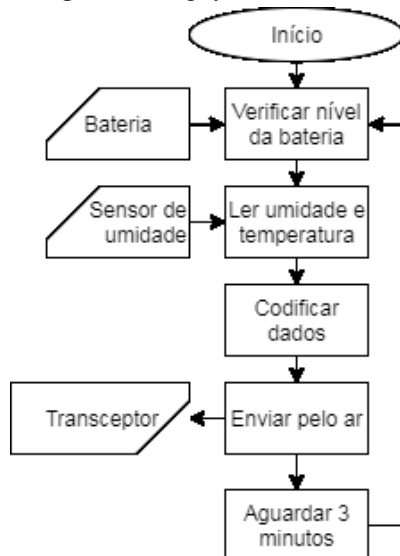
Fonte: Autor deste documento.

Caso o subsistema de válvulas fique mais de uma hora sem receber algum comando da central, ocorre um pedido de comunicação, apenas para testar o funcionamento da central e do *link* de comunicação entre a central e as válvulas. Caso não haja resposta, o sistema de válvulas entra num estado de segurança, um sub algoritmo, que consiste em acionar as válvulas anteriormente em funcionamento (isto é, apenas as válvulas que já tiveram algum acionamento desde que o sistema foi ligado) de hora em hora, durante três minutos. De hora em hora também é feita nova tentativa de comunicação, que se for bem sucedida interrompe o estado de segurança e o algoritmo principal torna a ser executado. O estado de segurança visa manter a continuidade da cura em caso de falha da central ou problemas na comunicação entre a central e as válvulas. Ela permanece até que a comunicação seja bem sucedida ou as válvulas desligadas.

4.5.3. Algoritmo dos sensores sem fio

O fluxograma da Figura 4.18 apresenta o algoritmo simplificado usado nos sensores usados em lajes e pisos. Pode-se observar que é realizada uma leitura a cada três minutos. A baixa frequência de medição se deve à lentidão na variação da umidade, que torna desnecessário medições mais frequentes. Além disso, isso reduz o consumo energético e aumenta a autonomia das baterias.

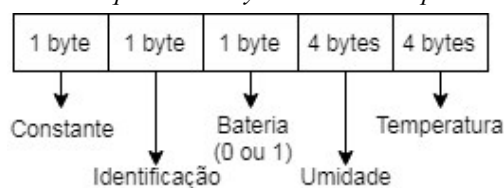
Figura 4.18 – Algoritmo simplificado dos sensores inseríveis.



Fonte: Autor deste documento.

Nota-se no diagrama da Figura 4.18 que uma codificação ocorre antes da transmissão. Essa codificação serve como padrão do *payload*, para que na recepção se possa decodificar. É transmitido para a central o número de identificação do sensor (cada um dos seis sensores tem um), um *byte* booleano indicando se a bateria está ou não fraca, a umidade e a temperatura medidas (estas são variáveis do tipo *float*, portanto ocupam 4 *bytes* cada) e no início um *byte* de reconhecimento, que é constante e igual para todos os sensores e reconhecido unicamente pela central associada (dois sistemas atuando próximos, portanto, não teriam problemas recebendo dados de outros sensores que não os seus). A Figura 4.19 traz a sequência de *bytes* transmitidos ilustrada.

Figura 4.19 – Sequência de bytes transmitida pelos sensores.



Fonte: Autor deste documento.

Na central, é possível verificar o estado de umidade de cada sensor separadamente, inclusive o estado da bateria ou se há condensação no elemento sensor. Ou ainda se o sensor parou de transmitir à central. Cada sensor sem fio, como já mencionado, possui um número de identificação próprio, que é carregado no *payload* transmitido. Externamente o sensor deve carregar consigo uma etiqueta ou algum outro tipo de marcação física especificando este número de identificação, para que eventuais problemas possam ser sanados diretamente. A numeração ainda permite elaborar mapas de sensoriamento em plantas baixas, por exemplo, o que facilitaria ainda mais localizar o sensor defeituoso ou condensado para que as devidas manutenções fossem realizadas.

4.6. Considerações Finais

Neste capítulo descreveu-se os principais componentes e módulos utilizados na construção do protótipo, juntamente com os preços praticados no mercado. A maioria dos componentes, se comprados em grande quantidade, têm os preços reduzidos. Portanto uma eventual fabricação em massa do sistema, ainda que fosse realizada do modo como está, sem otimizações e substituições de peças, poderia ter um custo de peças menor do que o gasto para construir o protótipo.

Descreveu-se também a lógica de funcionamento do sistema, a partir de diagramas que descrevem como os blocos do sistema se comunicam entre si e quais funções ele tem, além de quais os principais componentes associados a cada um.

Os diagramas elétricos também foram exibidos e tem como um ponto a ser pontuado a necessidade de compatibilidade elétrica e de protocolos para seu funcionamento. No caso dos sensores sem fio, há dois protocolos de comunicação serial em uso. O I²C e o SPI. O SPI é usado em todos os blocos por ser o responsável pela comunicação do transceptor ao microcontrolador.

Por fim deu-se uma visão geral dos algoritmos executados pelos microcontroladores, por meio de fluxogramas.

CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo os resultados obtidos nos testes com o protótipo serão abordados. As condições de teste, os erros encontrados e os sucessos serão descritos. Hipóteses serão levantadas e melhorias propostas.

Far-se-á uma estimativa dos custos envolvidos na construção do protótipo.

Sugestões de trabalhos futuros envolvendo o tema e o protótipo encerrarão este trabalho.

5.2. O protótipo

Uma vez confeccionados os circuitos impressos, feitos por meio da técnica de transferência térmica, os circuitos foram acomodados em carcaças de madeira ou papelão, de modo a ter uma usabilidade adequada para a realização de testes.

Na Figura 5.1 pode-se observar um dos sensores sem fio montado numa caixa de papelão e madeira aglomerada revestidos com um filme plástico. Na frente é possível observar a presença de um *LED* indicador e uma chave deslizante para ligar a desligar. No lado oposto ao mostrado na fotografia se encontra o compartimento de pilhas, onde são usadas duas pilhas de tamanho AA.

Figura 5.1 – Sensor sem fio.



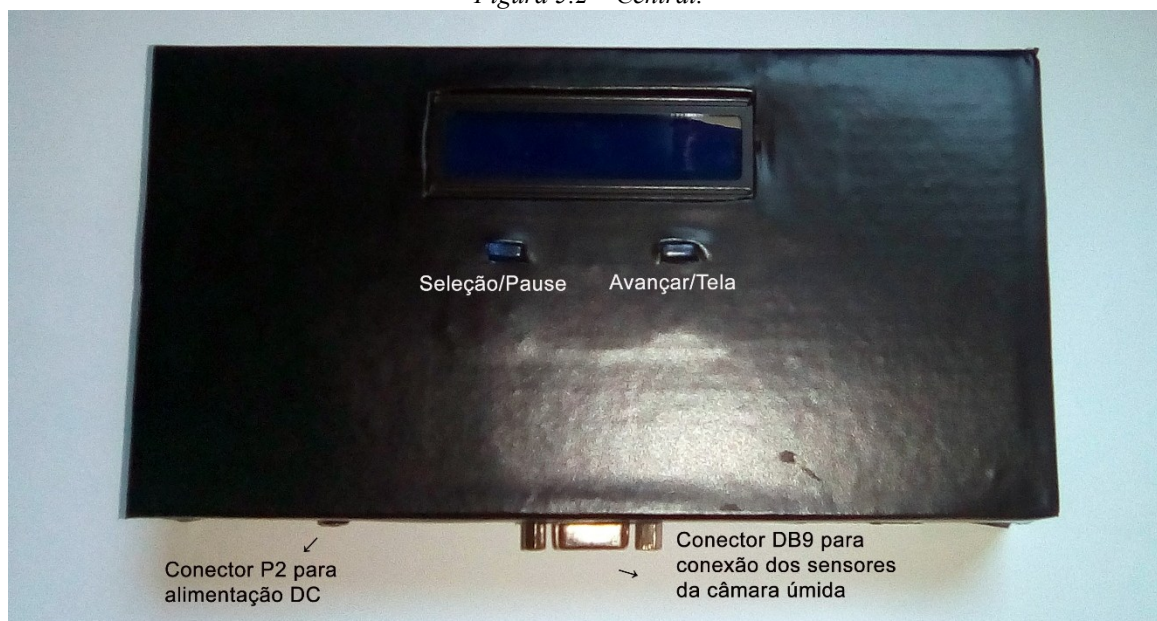
Fonte: Autor deste documento.

A haste metálica que sai do corpo da caixa que acomoda os circuitos é a sonda propriamente dita, que é inserida num furo do concreto. A haste é de alumínio e dentro dela percorrem os fios que comunicam o sensor HDC1080 posicionado na ponta da haste até o microcontrolador que fica na caixa.

Para os testes foram confeccionados dois sensores do tipo, não os seis previstos em projeto. O motivo era reduzir os custos, uma vez que os testes planejados não requereriam um número maior de sensores, além de serem facilmente simulados para a realização de testes.

Já na Figura 5.2 tem-se uma imagem da central, na qual os circuitos foram acomodados numa caixa de papelão revestida com filme plástico.

Figura 5.2 – Central.



Fonte: Autor deste documento.

Pode-se observar que além da tela e dos botões de comando, a central conta com dois conectores externos. Uma delas, do tipo P2, é usada para alimentar a central, por meio de uma adaptador AC/DC. Na parte traseira da central se encontra um compartimento de pilhas, que acomoda 4 pilhas AA que servem de reserva em caso de queda de energia, mantendo o sistema ativo e configurado.

O sistema de válvulas é mostrado na Figura 5.3. Os circuitos, válvulas e as conexões hidráulicas estão no interior de uma caixa de madeira MDF revestida com filme plástico.

Figura 5.3 – Sistema de válvulas.



Fonte: Autor deste documento.

Observa-se que há um botão frontal, usado para ligar e desligar o sistema de válvulas, rodeado por dois *LEDs* indicadores, um indicando se o sistema está ligado e outro que indica quando o sistema de válvulas está em modo de segurança ou que a cura foi completada.

As três conexões de ½” frontais são as saídas de três válvulas. O protótipo não foi montado com as sete válvulas do projeto por motivo de custos e por ser desnecessário para os testes que seriam realizados. Assim, a primeira conexão da esquerda para a direita corresponde à válvula de número zero, responsável pela câmara úmida, e as outras duas são as válvulas número um e dois, referentes aos sensores sem fio um e dois disponível. Nos testes que requeriam um número maior de válvulas, foram usados *LEDs* para simular o acionamento de tais válvulas.

Na parte traseira da caixa ainda se encontra um cabo de alimentação AC, diretamente ligado à rede elétrica de 110V, e uma outra conexão de ½” para a entrada de água.

5.3. Testes simulados

O primeiro ensaio consistiu em colocar um sensor sem fio num bloco de concreto jovem submerso em água. A figura 5.4 mostra o bloco sendo preparado e o sensor posicionado num furo do bloco.

Figura 5.4 – Teste de condensação.



Fonte: Autor deste documento.

O concreto usado no bloco foi preparado com britas, areia lavada de rio e cimento, relação água/cimento de 0,7. A granulação das britas é a número 1. O concreto foi moldado em uma caixa de madeira. 12 horas depois da aplicação, o bloco foi desmoldado e perfurado com furadeira e uma broca de 12 mm. O sensor foi instalado e o bloco, cujas dimensões é 6,8x11,5x6,3 cm, mantido submerso em água, de modo que a linha d'água se aproximasse da

aresta superior do bloco. Durante 7 dias o sensor transmitiu dados da umidade a cada três minutos. Este ensaio visava verificar se ocorreria alguma condensação sobre o elemento sensor num ambiente de alta umidade semelhante à encontrada numa situação normal de uso, caso em que a leitura do sensor passa a ser nula. Não houve condensação registrada.

O sistema também foi testado com os sensores inseríveis e os da câmara úmida ao ar livre, situação onde a umidade relativa é interpretada pelo sistema como abaixo do ideal. Nessas condições, as válvulas responderam conforme o esperado, sendo que apenas as válvulas correspondentes ao sensores avaliados foram acionadas. A temporização entre medições, bem como a espera de 10 minutos entre um acionamento e outro da válvula e o tempo de 3 minutos que permanece ligada, ocorreram conforme planejado.

O modo de segurança foi testado desligando-se a central e mantendo as válvulas ligadas. Ao fim de uma hora o modo de segurança foi ativado e somente as válvulas anteriormente usadas passaram a ser acionadas de hora em hora durante exatos três minutos, conforme era esperado. Religando e reconfigurando-se a central, em até uma hora o modo de segurança era interrompido e o modo comum era reativado. Isto indica o correto funcionamento do modo de segurança.

Por fim, caso algum sensor fosse desligado, em até dez minutos, tempo previsto em algoritmo, caso não fosse religado, a central passava a informar que o sensor estava ausente. Caso os sensores da câmara fossem desconectados da central, imediatamente também ocorria uma mensagem de erro na tela.

Para simular a presença de todas as válvulas, foram usados *LEDs* indicadores. Para simular outros sensores, um transceptor foi ligado à placa de desenvolvimento do MSP430 e o algoritmo dos sensores sem fio foi adaptado para gerar valores de umidade aleatórios. Assim foi possível simular a presença de todos os seis sensores ativos no sistema, transmitindo informações para a central. Os resultados foram os esperados, com os *LEDs* que representavam as válvulas sendo acionadas conforme o planejado, respeitando as temporizações, a identidade própria (cada válvula respondendo exclusivamente a seu respectivo sensor) e os parâmetros de comparação das entradas.

A função de pausa e sua expiração automática após quinze minutos funcionou como previsto.

Os testes foram realizados para cada um dos três modos do sistema (câmara, laje e ambos).

5.4. Testes na câmara úmida

O protótipo foi testado numa câmara úmida de cura de corpos de prova sem nenhum outro sistema de controle de umidade já disponível. A Figura 5.5 mostra a central instalada ao lado da porta da câmara. Pode-se observar os cabos dos sensores adentrando a câmara por um furo na parede.

Figura 5.5 – Central instalada na câmara úmida, ao lado da entrada.



Fonte: Autor deste documento.

Na Figura 5.6 há um detalhe da tela, mostrando a umidade medida no momento da fotografia.

Figura 5.6 – Central exibindo as informações de umidade e temperatura dentro da câmara úmida.



Fonte: Autor deste documento.

A Figura 5.7, por sua vez, mostra o subsistema de válvulas em cima da câmara. Chega nele (atrás) uma mangueira conectada a uma torneira e na saída da válvula 0 o encanamento segue para dentro da câmara, por um furo no teto, onde há aspersores posicionados no teto. Por ser um protótipo, foram usadas apenas três válvulas em vez de sete. No entanto o circuito, algoritmo e chassi estão prontos para receber as quatro válvulas restantes.

Figura 5.7 – Subsistema de válvulas instalado, com encanamentos flexíveis para transporte da água usada na cura.



Fonte: Autor deste documento.

Na Figura 5.8, em primeiro plano, vê-se um dos aspersores, e ao fundo um dos sensores colado à parede da câmara.

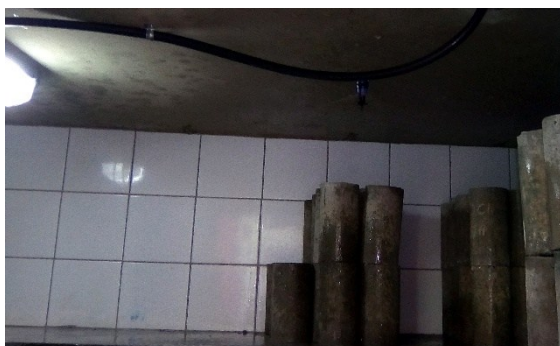
Figura 5.8 – Aspersor e sensor instalados na câmara úmida.



Fonte: Autor deste documento.

Na Figura 5.9 o aspersor jorra água para dentro da câmara, uma vez que a umidade relativa estava abaixo de 95%.

Figura 5.9 – Aspersão de água dentro da câmara úmida.



Fonte: Autor deste documento.

Nas observações realizadas, o sistema respondeu conforme esperado. De modo a abaixar a umidade relativa dentro da câmara, esta era deixada com a porta aberta durante algum tempo. Quando a umidade caía abaixo de 95%, em até dois minutos (este tempo de espera se deve a

um *delay* colocado propositalmente no algoritmo, já que não se espera variações bruscas na umidade) o sistema ligava a válvula específica da câmara e somente ela, permitindo o fluxo de água. A umidade subia conforme esperado, principalmente fechando-se a porta. Caso a umidade se mantivesse abaixo de 95% (situação com a porta mantida aberta), um novo acionamento se dava somente após dez minutos, conforme estipulado pelo algoritmo das válvulas, podendo haver mais um atraso adicional de até dois minutos devido ao *delay* já mencionado acima.

Nas sete checagens realizadas com o sistema em repouso (câmara em seu estado habitual, isto é, fechada e aberta por curtos períodos esporadicamente), o sistema indicava sempre uma umidade relativa entre 97,5 e 99,3%, com uma média aritmética de 98,9%.

O sistema permaneceu montado na câmara úmida por 45 dias. Neste tempo foram reportados vazamentos na válvula, um suave gotejamento numa das conexões internas. O sistema não estava alimentado com as pilhas de proteção, era ligado somente à rede elétrica. Em quatro ocasiões, pelo menos, constatou-se que o sistema havia reiniciado e central pedia a configuração inicial. Não se sabe, porém, se foi devido a alguma queda de energia, se por travamento ou outro defeito no protótipo, ou se ele foi desligado temporariamente da tomada para liberar a tomada para outros usos. A câmara usada pertence ao Laboratório de Análises de Materiais do Centro Universitário de Patos de Minas, onde há diário fluxo de estudantes e utilização de ferramentas.

Ao final do teste, quando o protótipo foi levado embora e vistoriado, constatou-se que a válvula responsável pela câmara úmida estava danificada na bobina. O estufamento e o curto nas bobinas, no entanto, sugere que o sistema de válvulas possa ter sido conectado temporariamente na tomada de 220V existente ao lado da tomada de 127 V em que estivera ligado, o que provocaria uma sobrecorrente na bobina.

5.5. Testes em pisos de concreto

5.5.1. Primeiro teste

O primeiro teste realizado com o sistema atuando sobre uma estrutura de concreto foi realizado numa pequena área concretada exclusivamente para este fim, como mostrado da Figura 5.10. O concreto usado teve como aglomerados areia lavada de rio e britas nº 1.

A área de teste foi de aproximadamente 32 x 75 cm, com uma espessura de aproximadamente 6 cm, no quintal da residência do autor. Após 12 horas da concretagem, foi feito um furo no centro da área, com uma profundidade de 2,4 cm, ou seja, 40% da espessura do piso, conforme estipulado pela norma [14].

Figura 5.10 – Concretagem da área de teste.



Fonte: Autor deste documento.

A sonda foi inserida neste furo e, na ausência de uma “luva” adequada para vedar o furo conforme a exigência da norma [14], foi usado cola quente, conforme mostrado na Figura 5.11. Esta vedação visa evitar trocas gasosas entre o furo e o meio externo e também evita que água jogada sobre o concreto escoar para dentro do furo, o que invalidaria a medição e submergiria o elemento sensor, inutilizando-o temporária ou definitivamente.

Figura 5.11 – Vedação do furo com cola quente.



Fonte: Autor deste documento.

O sistema de válvulas foi instalado ao lado, devidamente alimentado com água proveniente da rede de abastecimento e com energia elétrica. Uma mangueira com furos foi esticada na área concretada. A central permaneceu ligada na parte interna da casa do autor, a mais de dez metros do sensor e das válvulas. A Figura 5.12 mostra o sistema montado, pronto para monitorar e manter a cura da área concretada. Pode-se observar a presença do sistema de válvulas, a caixa preta maior, onde chega uma mangueira ligada a uma torneira mantida aberta, de onde sai uma fina mangueira branca e transparente que sai das válvulas e se estende sobre o concreto, mantida esticada por dois pesos e também onde chega o cabo de alimentação, ligado à rede elétrica de 127 V; e também o sensor sem fio, inserido no furo no concreto, alimentado por pilhas.

A área concretada tem incidência direta de luz solar a maior parte da tarde.

Figura 5.12 – Sistema montado para realização do teste.



Fonte: Autor deste documento.

O sistema foi mantido ligado por sete dias seguidos. Diariamente foram realizadas três ou quatro leituras manuais, na central, da umidade medida pelo sensor. Os intervalos entre cada leitura foram aleatórios e todas as medições foram feitas durante o dia, nenhuma à noite. As médias das leituras e as condições climáticas de cada dia estão discriminadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Umidade medida no concreto e condições climáticas no primeiro teste.

Dia	1	2	3	4	5	6	7
Umidade relativa média	99,9%	99,8%	99,9%	99,1%	98,4%	98,2%	97,9%
Clima	Nublado	Nublado	Chuvoso	Nublado	Ensolarado	Ensolarado	Ensolarado

Fonte: Autor deste documento.

Pela leitura da tabela pode-se observar a quase total estabilidade da umidade medida dentro do furo do concreto, mesmo nos dias de sol. De fato a umidade relativa medida pelo sensor não apresenta jamais ter caído abaixo de 80%, valor usado pelo sistema como referência, definido com base pelas referências [12] e [13] e com as considerações da Seção 3.2. Assim sendo, em nenhum momento as válvulas foram acionadas, pelo simples fato de que a central não considerou necessário, uma vez que as leituras recebidas do sensor estavam muito acima dessa referência.

Esta quase ausência de variação na umidade dentro do furo no concreto levou a três hipóteses que tentam explicar a situação.

A primeira, de que a umidade não caiu porque o concreto realmente se manteve úmido e, portanto, qualquer molhagem seria desnecessária. Neste caso, as molhagens realizadas de praxe nas obras, já no dia seguinte à concretagem, provavelmente seriam apenas uma convenção, sem real benefício.

A segunda, de que a umidade medida desta forma, por meio de uma sonda *in situ*, não é capaz de representar satisfatoriamente a umidade geral do concreto jovem, por diversos possíveis motivos.

A terceira, de que a profundidade escolhida para a instalação do sensor é inadequada, sobretudo considerando-se que a evaporação da água do concreto ocorre em sua superfície, e portanto a perda de água começaria em cima e lentamente é que as camadas inferiores perderiam água.

A terceira hipótese levou à realização do segundo teste num piso de concreto, onde a sonda foi instalada de modo mais superficial de modo a checar se a umidade cairia de modo mais pronunciado.

5.5.2. Segundo teste

O segundo teste foi realizado de modo análogo ao primeiro. O concreto foi novamente preparado com areia lavada de rio e brita nº 1. No entanto a área e a espessura do concreto foi diferente. A nova área, concretada ao lado da primeira, teve dimensões 106 x 78 cm e 4,5 cm de espessura, aproximadamente. A Figura 5.13 ilustra a preparação desta área para teste.

Figura 5.13 – Concretagem da nova área de teste.



Fonte: Autor deste documento.

Após 12 horas da concretagem, foi feito um furo no concreto, e a sonda foi instalada apenas a 0,5 cm da superfície. Novamente foi usada cola quente para vedar o furo e novamente as válvulas foram instaladas ao lado do sensor e a central permaneceu no interior da residência do autor. A Figura 5.14 ilustra a nova montagem do sistema para teste.

A área concretada tem incidência direta de luz solar a maior parte da tarde.

Figura 5.14 – Sistema montado para a realização de novo teste.



Fonte: Autor deste documento.

O sistema foi mantido ligado por seis dias seguidos. Diariamente foram realizadas três ou quatro leituras manuais, na central, da umidade medida pelo sensor. Os intervalos entre cada leitura foram aleatórios e todas as medições foram feitas durante o dia, nenhuma à noite. As médias das leituras e as condições climáticas de cada dia estão discriminadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Umidade medida no concreto e condições climáticas no segundo teste.

Dia	1	2	3	4	5	6
Umidade relativa média	99,9%	99,2%	98,7%	96,6%	95,4%	93,9%
Clima	Ensolarado	Ensolarado	Ensolarado	Ensolarado	Ensolarado	Ensolarado

Fonte: Autor deste documento.

Pela leitura da tabela pode-se observar que novamente houve uma pequena variação da umidade medida dentro do furo do concreto, mesmo que o concreto tenha sido mantido num clima seco, sem nenhum tipo de umidificação por água pluvial no período de teste. Pode-se observar, no entanto, que as medições foram de valores mais baixos deste vez; mas novamente não houve medições abaixo de 80%. Assim sendo, mais uma vez, em nenhum momento as válvulas foram acionadas.

A falta de êxito em obter os resultados esperados no novo teste evidencia que a terceira hipótese não é a única responsável pela falha. No entanto, como houve uma pequena melhora nos resultados, pode-se concluir que a profundidade da sonda influencia, de fato, na umidade medida. O mais provável é que haja uma influência tanto da segunda quanto da terceira hipótese, porém com maior peso da segunda.

5.6. Custos do protótipo

A construção do protótipo do modo que está (dois sensores sem fio e apenas três válvulas) demandou os valores discriminados na Tabela 5.3. Os custos são estimados, pois alguns materiais já eram de propriedade do autor e terão o preço aproximado, outros foram reciclados de sucata eletrônica e, portanto, terão o preço definido com base na cotação do material novo, no varejo. Os materiais recebidos como doação ou amostra grátis, terão o preço definido aqui com base no preço praticado pelo varejo. Os preços se referem à data de compra ou à data da cotação, realizadas entre agosto de 2016 e novembro de 2017. Os preços em Dólar Americano foram convertidos para o Real Brasileiro com a cotação vigente no dia 19 de novembro de 2017. Uma eventual produção em série envolveria mais variáveis que poderiam encarecer ou baratear o custo final do produto, como os descontos pela compra no atacado dos materiais, redução de custos com otimizações, e os custos adicionais com design e chassi.

Tabela 5.3 – Custos aproximados do protótipo.

Produto	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
MSP430G2553	5	US\$2,41	R\$39,25
nRF24l01	4	R\$6,00	R\$24,00
AM2302	2	R\$15,00	R\$30,00
Pilhas secas AA	8	R\$0,75	R\$6,00
LCD 1602A	1	R\$10,00	R\$10,00
HDC1080	2	US\$3,02	R\$19,68
Resistores	±30	Variável	±R\$8,00
Semicondutores discretos (exceto LED)	±4	Variável	±R\$3,50
Capacitores	±30	Variável	±R\$12,00
EVA06 v127V	3	R\$22,90	R\$68,70
LH1056	7	R\$9,00	R\$63,00
Adaptadores AC/DC	2	Variável	R\$30,00
Regulador 7805	1	R\$1,30	R\$1,30
LM1085 v3.3	2	R\$6,80	R\$13,60
Push Button	2	R\$0,50	R\$1,00
LED 3 mm	4	R\$0,35	R\$1,40
Outros (solda, fios, cabos, madeira, PCB, encaamentos, aspersores, papelão, conectores, cola, parafusos, revestimentos, tubos, abraçadeiras, adaptadores, interruptor, etc)		Variável	±R\$125
Total:			R\$456,43

Fonte: Autor deste documento.

5.7. Sugestões para trabalhos futuros

Diversas são as oportunidades de continuar este estudo. Uma delas se refere a tentar um outro tipo de feedback da umidade do concreto, que não seja baseado numa sonda *in situ*. Uma alternativa seria medir a umidade na superfície do concreto, nem que com o uso de um tipo diferente de sensor.

Outro estudo interessante seria comparar a resistência de um concreto curado com o sistema, usando amostras de controle mantidas no ar livre sem nenhum tipo de molhagem. Isto permite avaliar se o sistema faz o que realmente objetiva fazer: aumentar a qualidade do concreto controlando a cura automaticamente.

Há ainda a possibilidade de realizar um estudo para definir a melhor maneira e o número mínimo ideal de sondas por área concretada.

Melhorias no protótipo, tanto a nível de *hardware* quanto de algoritmos, também podem ser estudadas, incluindo o acréscimo de funções como salvamento configurações, definição manual do nível de umidade desejada, um sistema de alarme em caso de falha, otimizações, redução de custos, etc. A total separação da parte hidráulica e elétrica, que não foi feita neste trabalho, também é recomendável.

5.8. Considerações finais

O presente trabalho teve como principal objetivo elaborar um protótipo, que teria como função monitorar, por meio de sensores, a umidade relativa interna de estruturas de concreto e a umidade relativa interna em câmaras úmidas, visando uma otimização da cura, eventual, economia de água e uma quase independência de mão de obra para a cura do concreto (seria necessário um operador apenas para a instalação do sistema, depois disso ele atuaria sozinho).

Com esse intuito, iniciou-se o mesmo com um criterioso estudo sobre concreto e os requisitos para uma cura adequada, capaz de otimizar as propriedades desejáveis do material. Também foram analisadas normas técnicas que ditam metodologias para uma medição da umidade interna do concreto e as normas referentes à cura de corpos de prova em câmaras úmidas. Uma vez definidos estes requisitos, foi possível determinar os materiais necessários para a confecção de um protótipo que suprisse tais requisitos.

Realizado tais estudos e determinados os materiais, criou-se o algoritmo seguindo índices indicados nas normas e também o *design* e construção do *hardware*. Cada parte do sistema foi elaborado tendo o devido cuidado para que houvesse a correta comunicação entre as mesmas e a compatibilidade elétrica necessária ao correto funcionamento e máxima vida útil

de cada componente. Diversos testes simulados foram realizados para atestar o correto funcionamento do *hardware* e do *software* desenvolvidos.

Montado o protótipo, foram realizados alguns testes para averiguar o funcionamento do mesmo. O primeiro teste foi para averiguar se haveria condensação no sensor após este ser submetido por um tempo longo a um ambiente de alta umidade, dentro de um bloco de concreto, de modo análogo ao que ocorreria na utilização *de facto* do sistema. A condensação, indesejável, não ocorreu.

Com o teste realizado na câmara úmida, o sistema respondeu conforme esperado. De modo a abaixar a umidade relativa dentro da câmara, esta era deixada com a porta aberta durante algum tempo. Quando a umidade caía abaixo do valor desejado, o sistema ligava a válvula específica da câmara e somente ela, permitindo o fluxo de água. A umidade, então, subia conforme o esperado. No tempo que o sistema foi usado na câmara úmida, foram reportados vazamentos na válvula, um suave gotejamento numa das conexões internas. O sistema não estava alimentado com as pilhas de proteção, era ligado somente à rede elétrica. Em quatro ocasiões, pelo menos, constatou-se que o sistema havia reiniciado e central pedia a configuração inicial.

Para a verificação do protótipo em uma laje ou piso, foram realizados dois testes em pisos de concreto jovem, preparados exclusivamente para este fim. No primeiro verificou-se o não acionamento do protótipo pelo fato da umidade medida pelo sensor dentro do concreto não cair além do limite definido. O sistema, portanto, entende a alta umidade como indicativo da desnecessidade de realizar uma molhagem, não sendo um defeito do *hardware* ou do *software* o motivo do não acionamento. O segundo teste foi realizado devido a dúvida que surgiu com o resultado insatisfatório do primeiro teste, de que a profundidade escolhida para a instalação do sensor não fosse a mais adequada e por isso não houve a queda esperada na umidade do concreto com o passar do tempo. O novo teste, portanto, foi realizado com o sensor posicionado bem próximo à superfície. O resultado do segundo teste em muito pouco diferiu do primeiro.

Realizado os testes, pode-se averiguar que o protótipo indicou funcionar devidamente na câmara úmida, mas deve-se tomar o cuidado de instalar pilhas no mesmo para que não fique reiniciando, seja por possível falta de energia, bem como um desligamento indevido da tomada. Quanto sua utilização em laje, pelos testes realizados, e averiguando que todos os componentes estavam em perfeito funcionamento, e mesmo assim não houve o acionamento do protótipo, mesmo deixando o mesmo ligado por alguns dias, chega-se a algumas considerações que deverão ser averiguadas em continuidade ao projeto iniciado. Uma delas se refere a tentar um outro tipo de feedback da umidade do concreto, que não seja baseado numa sonda *in situ*. Uma

alternativa seria medir a umidade na superfície do concreto, nem que com o uso de um tipo diferente de sensor. Há ainda a possibilidade de realizar um estudo para definir a melhor maneira de instalar os sensores já existentes, buscando um resultado satisfatório.

Em resumo, o propósito do trabalho, de construir um protótipo de um sistema de cura de concretos, foi cumprido, ainda que os resultados não tenham sido os esperados. Do estudo pode-se concluir, porém, que a profundidade de instalação do sensor, influi, ainda que pouco, na umidade medida. Além disso, pode-se levantar algumas outras hipóteses que explicam a pequena queda de umidade verificada no concreto mesmo após dias da concretagem: a de que a umidade não caiu porque o concreto realmente se manteve úmido e, portanto, qualquer molhagem seria desnecessária. Neste caso, as molhagens realizadas de praxe nas obras, já no dia seguinte à concretagem, provavelmente seriam apenas uma convenção, sem real benefício. Ou a de que a umidade medida desta forma, por meio de uma sonda *in situ*, não é capaz de representar satisfatoriamente a umidade geral do concreto jovem, por diversos possíveis motivos, que podem ter a ver, inclusive, com quantidade de água usada no preparo do concreto. A alta umidade relativa do ar ambiente nos dias de teste, típicas da primavera na região do estudo, também pode ter influenciado na suposta baixa evaporação da água do concreto, já que esta evapora mais rápido quanto mais seco estiver o ar. Pode-se até mesmo questionar se o referencial de 80% de umidade do concreto previsto nas referências é realmente eficaz na promoção de uma cura adequada.

Todas estas hipóteses e sugestões de trabalhos futuros podem e devem ser abordados futuramente, já que devido à falta de mais tempo não puderam ser contemplados já no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] AUTOMAÇÃO eleva produtividade no canteiro de obras. Massa Cinzenta: Cimento Itambé, 2014. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/automacao-eleva-produtividade-no-canteiro-de-obras/>>. Acesso em: 30 jun. 2017.
- [2] Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5738 – Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro. 2003.
- [3] Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 9479 – Argamassa e Concreto — Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro. 2006.
- [4]. Bardela, P. S., et all. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado. São Carlos. 2005.
- [5] Batagin, A. F., et all. **Influência das Condições de Cura em Algumas Propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho, 41º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2002.
- [6] Peinado, H. S.. **Conheça as alternativas para fazer a cura de elementos de concreto**. Techné. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/201/conheca-as-alternativas-para-fazer-a-cura-de-elementos-de-302570-1.aspx>>. 2013. Acesso em 18 set 2016.
- [7] OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2011.
- [8] RIBEIRO, M. A. **Instrumentação**. 8. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1999. 478 p.
- [9] Aosong Electronics. **AM2302**. Datasheet. Guangzhou, China.
- [10] Texas Instruments. **HDC1080**. Datasheet. Dallas, EUA. 2016.
- [11] DAVIES, J. H. **MSP430 Microcontroller basics**, Newnes, 2008.
- [12] The Concrete Countertop Institute. **Temperature and relative humidity: what they mean for you and your concrete**. Disponível em: <<http://www.concretecountertopinstitute.com/temperature-and-relative-humidity-what-they-mean-for-you-and-your-concrete/>>. Acesso em 12 dez 2016.
- [13] Nasvik, J. **Curing Concrete Slabs**. Hanley Wood. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs141p2_023907.pdf>. 2002. Acesso em 3 jan 2017.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International. **F2170: Standard Test Method for Determining Relative Humidity in Concrete Floor Slabs Using *in situ* Probes**. EUA: American Society For Testing And Materials, 2014. 6 p.
- [15] Texas Instruments. **MSP430G2553**. Datasheet. Dallas, EUA. 2013.
- [16] Nordic Semiconductors. **nRF24L01+**. Datasheet. Trondheim, Noruega. 2008.