

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCEL PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA CONTROLE DE
POSIÇÃO DE REFLETOR SOLAR COM SISTEMA SUPERVISÓRIO**

PATO BRANCO

2022

MARCEL PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA CONTROLE DE
POSIÇÃO DE REFLETOR SOLAR COM SISTEMA SUPERVISÓRIO**

**Development of a positioning control system for solar reflectors with
supervisory system**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Fábio Luiz Bertotti

**PATO BRANCO
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARCEL PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA CONTROLE DE
POSIÇÃO DE REFLETOR SOLAR COM SISTEMA SUPERVISÓRIO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Fábio Luiz Bertotti

Data de aprovação: 30/11/2022

Fábio Luiz Bertotti
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

César Rafael Claure Torrico
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gustavo Weber Denardin
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

Dedico este trabalho a todos aqueles que já
cruzaram meu caminho e me ajudaram a chegar até
aqui.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que de qualquer forma, e de qualquer forma mesmo, contribuíram na minha jornada até aqui, meu muito obrigado.

Obrigado a minha família, que sempre me incentivou e me ajudou a seguir, sempre me deu forças e condições de poder chegar aonde eu cheguei.

Obrigado aos amigos que contribuíram positivamente durante a maior parte do tempo, mas também ajudaram quando era hora de “se prejudicar”.

Obrigado aos professores que nunca foram egoístas e sempre estiveram dispostos a dividir seu conhecimento, desde aqueles que me ensinaram a ler. Em especial aos professores Gustavo Weber Denardin e César Rafael Claire Torrico por terem aceitado participar da banca avaliadora e terem contribuído para a realização deste trabalho.

Agradeço também meu orientador, professor Fábio Luiz Bertotti, pela paciência e por todas as inúmeras contribuições neste trabalho.

Agradeço também a UTFPR como instituição de ensino, por toda sua estrutura e material, além de todas as oportunidades de crescimento e aprendizagem, espero que assim como eu, muitos possam aproveitar um ensino superior de qualidade e “gratuito”.

E agradeço em especial, minha “coorientadora”, que fez muitas contribuições não só para este trabalho, mas para toda minha vida, Klara Granetto Lusitani.

Todos os homens sonham, mas não da mesma forma. Os que sonham de noite, nos recessos poeirentos das suas mentes, acordam de manhã para verem que tudo, afinal, não passava de vaidade. Mas os que sonham acordados, esses são homens perigosos, pois realizam os seus sonhos de olhos abertos, tornando-os possíveis.
(LAWRENCE)

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal implementar um sistema para monitorar e controlar a posição de um concentrador linear de Fresnel em bancada, a partir de um sistema supervisório conectado à rede por meio de um *gateway* empregando um sensor LVDT e um motor de passo conectados a uma rede do tipo MODBUS RTU. Para atingir este objetivo foram utilizados microcontroladores da família STM32F103 como módulos escravos da rede, realizando a interface entre o sensor do tipo LVDT e a rede MODBUS e o motor de passo 28BYJ-48, juntamente de um driver baseado no circuito integrado Driver Uln2003 para compor o atuador do sistema. O sistema supervisório utilizado no presente trabalho foi desenvolvido fazendo-se o uso do ScadaBr, uma ferramenta de licença livre de fácil uso em computadores. Para a conexão entre o sistema supervisório e a rede MODBUS, foi desenvolvido um *gateway* a partir de um microcontrolador da família STM32F103. O sistema supervisório desenvolvido permitiu a comunicação com o sensor e o atuador.

Palavras-chave: MODBUS; ScadaBr; concentradores de Fresnel.

ABSTRACT

The present course conclusion paper has as its main objective to implement a system to watch and control the position of a linear Fresnel solar concentrator in bench, based on a supervisory system connected to the network through a gateway, using an LVDT and a step motor connected to the MODBUS RTU network. To achieve this goal microcontrollers of the STM32F103 family were used as network slave modules, making the interface between the LVDT sensor and the MODBUS network and the step motor 28BYJ-48, on pair with a driver circuit based on the integrated circuit Uln2003 to compose the actuator of the system. The supervisory system utilized on the present paper was developed utilizing the ScadaBr, a tool free of charges and easy to use on computers. For the connection between the supervisory system and the MODBUS network gateway was developed on a microcontroller from the STM32F103 family. The developed supervisory system allowed the communication with the sensor and the actuator.

Keywords: MODBUS; ScadaBr; Fresnel concentrators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de refletores do tipo Fresnel Linear.	18
Figura 2 - Partes construtivas de um transdutor LVDT.	21
Figura 3: Funcionamento do sistema em um diagrama de blocos	34
Figura 4: Placa de desenvolvimento Blue Pill e depurador ST-LINK V2	35
Figura 5: Motor de passo e circuito de driver	36
Figura 6: Sensor LVDT e PCI de instrumentação.	37
Figura 7: Diagrama de blocos do módulo sensor	40
Figura 8: Diagrama de blocos do módulo atuador	41
Figura 9: Configuração de <i>data source</i>	43
Figura 10: Configuração do data point	44
Figura 11: Diagrama de funcionamento de evento de movimentação dos espelhos	45
Figura 12: Configuração de evento agendado	46
Figura 13: Configuração de tratador de evento	46
Figura 14: Script de alteração de valor	47
Figura 15: Rede MODBUS	49
Figura 16: Interface gráfica ScadaBr	50
Figura 17: Leitura dos dados da rede MODBUS pelo STM32CubeIDE	51
Figura 18: Módulo atuador	51
Figura 19: Generic MODBUS tester	52
Figura 20: Testes na rede MODBUS a partir do ScadaBr	53
Figura 21: <i>Watch List</i> dos <i>Data points</i> configurados no sistema supervisorio	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: MODBUS código de funções	31
Quadro 2: Formato do telegrama (frame) usado no MODBUS-RTU	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	14
1.1.1 Objetivos específicos	14
1.2 Organização do trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Energia solar	16
2.2 Sistemas de rastreamento solar	18
2.2.1 Sensores aplicados em concentradores solares	19
<u>2.2.1.1 Encoders</u>	<u>20</u>
<u>2.2.1.2 Inclinômetros</u>	<u>20</u>
<u>2.2.1.3 Transdutor Linear Diferencial Variável (LVDT)</u>	<u>21</u>
2.2.2 Atuadores	22
2.3 Redes e protocolos de sensores industriais	24
2.3.1 Protocolos de Redes Industriais	27
<u>2.3.1.1 Profibus</u>	<u>28</u>
<u>2.3.1.2 CAN</u>	<u>29</u>
<u>2.3.1.3 MODBUS</u>	<u>29</u>
2.4 Sistemas supervisórios	32
3 MATERIAS E MÉTODOS	34
3.1 Microcontrolador STM32F103 e placa Blue Pill	35
3.2 Motor de passo e circuito de acionamento	36
3.3 Sensor LVDT	37
3.4 CI de interface física RS-485	37
3.5 Ambiente de desenvolvimento integrado STM32cubeIDE	38
3.6 ScadaBr	38
3.7 Escravos MODBUS	39
3.8 Módulo sensor	39
3.9 Módulo atuador	40
3.10 Conversor RS-485 para USB	42
3.11 Sistema Supervisório	42

4 RESULTADOS	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Mesmo possuindo uma matriz energética diversificada, a geração de energia a partir de fontes renováveis no Brasil permanece fortemente atrelada ao consumo dos derivados de cana-de-açúcar e ao carvão vegetal (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). O aumento da demanda energética no país e a crescente busca pela sustentabilidade das indústrias, aliados aos altos níveis de irradiação solar no Brasil, favorecem soluções para a geração de energia solar (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

As formas mais comuns de aproveitamento da energia solar são a fotovoltaica e a solar térmica. A geração de energia fotovoltaica está crescendo significativamente no mercado, em parte, devido as regulamentações estabelecidas pelas concessionárias de energia e ao incentivo governamental em alguns estados. Em 2017, a energia fotovoltaica representou apenas 0,0008% da capacidade total instalada no Brasil (RELLA, 2017), chegando a 1,45% no ano de 2019 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

A energia solar térmica possui menos incentivos por parte do governo que a energia fotovoltaica. A energia solar térmica é uma boa opção para indústrias do ramo alimentício, pois possui um grande potencial de aplicação em processos que precisem de aquecimentos em temperaturas baixas, abaixo dos 100°C, e médias, abaixo dos 250°C (JUNIOR; SACOMANO; NETO, 2014).

Mesmo com todo o potencial energético solar brasileiro, é notável que em sua maior parte, a energia solar térmica é utilizada em ambientes residenciais por meio de coletores abertos e reservatórios de baixa pressão, em geral de menor custo, mas também menor proveito da energia solar. Cabe ainda ressaltar que as vendas de novos sistemas de aquecimento solar para indústrias representaram apenas 4% das vendas totais no ano de 2021, indicando que mesmo durante a crise energética, a energia solar térmica não foi vista como uma boa opção o setor industrial brasileiro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA, 2022).

A coleta da energia solar térmica pode ser realizada por meio de painéis ou concentradores solares. Os painéis solares são comumente utilizados para aquecimento de água em residências, hotéis e empresas. Por outro lado, os concentradores solares são aplicados em casos em que se deseja atingir

temperaturas acima dos 100°C, recebendo a energia solar incidente em uma grande área e concentrando-a em uma área muito menor, é possível atingir temperaturas mais elevadas, de até 600°C, permitindo o uso de tais coletores de energia em uma infinidade de processos.

Entretanto, as aplicações de concentradores solares térmicos que apresentam um maior potencial são as de temperaturas médias e baixas, entre 60°C e 200°C, pois tais sistemas são de complexidade média e abrangem inúmeros processos de esterilização, cozimento, branqueamento, secagem, alimentação de caldeiras, pré-aquecimento entre outros, tendo maior uso entre processos da indústria alimentícia.

Um concentrador solar indicado para tais processos seria o Refletor Linear Fresnel, devido a simplicidade de suas características construtivas, uma vez que é constituído de um grupo de espelhos ou refletores planos, podendo ser levemente curvados, para concentrar a irradiação solar em um tubo absorvedor. Essas características construtivas fazem com que o Refletor Linear de Fresnel tenha um baixo custo estrutural, de operação e manutenção, sendo assim uma solução atrativa economicamente (CARVALHO, 2017). Um dos desafios para que este tipo de tecnologia seja mais competitivo no mercado de concentradores solares é a necessidade de um sistema de posicionamento preciso para maximizar a eficiência energética (CARVALHO *et al*, 2016).

Diversos sistemas para ajuste da posição de refletores de concentradores solares foram propostos. Em geral, esses sistemas, também conhecidos como rastreadores solares, utilizam sensores para obter a posição dos refletores, um sistema de controle e atuadores. Para um posicionamento preciso é importante que os sensores forneçam informações com a precisão requerida e com boa exatidão. Além disso, tanto os atuadores como os sensores precisam ser robustos, uma vez que são sujeitos a intempéries (PELEGRIN, 2021).

Diferentes tipos de sensores de posição podem ser utilizados em sistemas de rastreamentos. Um exemplo são os encoders que fornecem a posição angular de refletores solares. Recentemente, Carvalho *et al* (2016) considerou o uso de um Transformador Diferencial Variável Linear ou LVDT (do inglês, *Linear Variable Differential Transformer*) e um sistema de instrumentação para obter a posição de refletores de Fresnel. O LVDT é um transdutor de posição linear, que possui um conjunto de três bobinas acopladas magneticamente por um núcleo móvel, a

maneira com que as bobinas são acopladas faz com que a diferença entre as saídas de tensão das bobinas secundárias seja proporcional à posição do núcleo. As vantagens dos LVDTs compreendem sua excelente vida útil, alta resolução, além de ser compatível com um grande número de aplicações. Carvalho *et al* (2016) também desenvolveu um mecanismo para converter a posição angular em posição linear, permitindo o uso do LVDT.

Os sensores e atuadores de um sistema de rastreamento solar podem receber ou fornecer informações digitalmente ao controlador por meio de uma rede de comunicação de dados. Uma vantagem notável de se utilizar uma rede de comunicação é a maior imunidade a interferências eletromagnéticas, quando comparado com sinais analógicos oriundos de sensores, por exemplo (MORAES; CASTRUCCI, 2007). Nesse sentido, as tecnologias de redes industriais ganham importância. Um dos protocolos tipicamente utilizado é o MODBUS, juntamente com interfaces padrão RS-485 (TAMBOLI, 2015).

O controle e monitoramento remoto é um recurso relevante para sistemas de concentradores solares, uma vez que eles são instalados em ambientes externos e podem ocupar grandes espaços. Isso pode ser concretizado a partir de um sistema supervisorio referido como SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*). Um sistema supervisorio disponível com licença gratuita é o ScadaBr, desenvolvido no modelo “*open-source*” a partir de um servidor de aplicação, o ScadaBr pode ser facilmente utilizado a partir de inúmeros sistemas operacionais a partir de um navegador de internet, sendo assim de fácil operação (SCADABR, 2010).

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em implementar um sistema para monitorar e controlar a posição de um concentrador linear de Fresnel em bancada a partir de um sistema supervisorio, de sensor LVDT e de um motor de passo, os quais são conectados a uma rede do tipo MODBUS RTU .

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que norteiam este trabalho são:

- Desenvolver uma interface de comunicação do tipo MODBUS RTU para o sensor LVDT;
- Desenvolver um sistema de driver e controle para o motor de passo;
- Desenvolver uma interface de comunicação do tipo MODBUS RTU para o atuador e para o sensor;
- Desenvolver um *gateway* USB/MODBUS RTU;
- Implementar o sistema supervisório ScadaBr;
- Integrar as partes do sistema e realizar teste funcional.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho de conclusão de curso está dividido em 5 Capítulos. O capítulo inicial, a Introdução, apresenta um breve relato sobre a real situação da energia solar térmica no Brasil, uma pequena introdução à coletores de energia térmica solar e os sistemas de rastreamento solar, além dos objetivos gerais e específicos do trabalho e sua organização.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, fracionada em 4 tópicos, sendo elas: Energia solar, sistemas de rastreamento solar, redes e protocolos de sensores industriais e sistemas supervisórios

O capítulo 3, intitulado Materiais e Métodos, apresentam-se os métodos utilizados para o desenvolvimento do sistema de controle de posição, como também, os materiais utilizados para sua confecção.

No capítulo 4 estão presentes os resultados obtidos com a pesquisa. E, por fim, no quinto e último capítulo, as considerações finais, onde as percepções dos resultados obtidos com este trabalho e os apontamentos finais estão expostos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordada a energia solar e as maneiras que a humanidade encontrou para aproveitá-la, bem como sistemas de rastreamento solar onde são comumente aplicados concentradores solares térmicos para aumentar a energia captada. Será abordado também redes industriais e os protocolos utilizados em redes de automação e sistemas de controle e, por fim, será abordado o assunto de sistemas supervisórios, suas aplicações e principais características.

2.1 Energia solar

No Sol ocorre o processo de fusão de núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, onde uma parte da massa das partículas é transformada em energia que é irradiada para todo o sistema solar. Uma vez que a Terra está a milhares de quilômetros do sol, apenas uma pequena parte dessa energia chega até a superfície do planeta e essa pequena parte é a base de toda a vida na Terra (GREENPRO, 2004).

A energia solar que chega ao planeta Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia de todo o mundo, porém, como essa energia chega apenas nas formas térmica e luminosa, transformá-la em trabalho é uma tarefa complexa (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A transformação da irradiação solar em uma forma de energia que permita sua utilização, seja em energia elétrica ou em energia térmica, dependerá de qual ferramenta é utilizada nesse processo de transformação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008). Ainda segundo a Agência Nacional De Energia Elétrica (2008), para a geração de energia elétrica se faz o uso de materiais semicondutores que compõem os painéis fotovoltaicos ou processos heliotérmicos, onde a irradiação solar é convertida em calor, sendo posteriormente utilizado em usinas termelétricas.

Para a conversão em energia térmica são utilizados materiais mais escuros, podendo ou não empregar sistemas de concentração da radiação com intuito de atingir temperaturas mais elevadas, conforme os requisitos da aplicação. Uma das aplicações mais difundidas desse tipo de tecnologia é o aquecimento de água para uso residencial (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008). Para tal, é

comum o uso de coletores planos, que atingem temperaturas mais baixas, inferiores a 100°C (NEGREIROS, 2015).

Para a indústria destaca-se o uso de concentradores solares, que possuem uma gama diversificada de tecnologias e temperaturas atingíveis (NEGREIROS, 2015) para as mais diversas aplicações onde sejam necessárias temperaturas mais elevadas, de 100°C até 600°C (TAPIA, 2011). Algumas das possíveis aplicações seriam os processos de secagem, esterilização, pasteurização, lavagem, arrefecimento, tingimento, branqueamento, desengorduramento, destilação, pré-aquecimento para água de caldeira, entre outros (PELEGRIN, 2021).

No Brasil, as regiões norte e nordeste possuem altos índices de irradiação solar, que chegam muito próximos às melhores regiões do mundo nesse quesito, tornando a área propícia para o aproveitamento dessa energia e, conseqüentemente, fortalecer ainda mais a matriz energética brasileira (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Levando em conta apenas os concentradores solares, que consistem na aplicação alvo do sistema proposto neste trabalho, o Brasil teria uma potência média anual de aproximadamente 3,3 a 4,9 TWe, sendo que a maior parcela dessa capacidade é aproveitada no estado da Bahia (SORIA, 2011).

O setor industrial representa o maior consumidor de energia elétrica do país, sendo que, em sua maioria, essa energia é usada para processos de aquecimento direto (BRASIL, 2021), é possível suprir parte dessa demanda por meio da energia solar térmica.

Os concentradores solares do tipo Fresnel linear, conforme ilustrado na Figura 1, apresentam um bom custo-benefício e tem grande potencial ainda inexplorado (BENYAKHLEF *et al*, 2016), sendo o foco de inúmeras pesquisas ao redor do mundo que visam melhorar sua eficiência, seja por meio da alteração do formato dos espelhos ou então de sistemas de posicionamento dos espelhos, concentrando a energia na linha desejada durante todo o dia. Estas pesquisas também visam diminuir ainda mais seu custo de instalação e manutenção, por meio do uso de diferentes materiais para os coletores e as estruturas que suportam os espelhos.

Figura 1 - Sistema de refletores do tipo Fresnel Linear.



Fonte: Walker (2013).

2.2 Sistemas de rastreamento solar

Para realizar o rastreamento solar e manter o reflexo solar alinhado à linha onde se concentra a energia solar, é feito o uso de motores acoplados a um eixo que movimenta os espelhos do concentrador, esses motores são controlados por um algoritmo de rastreamento solar (CARVALHO, 2017).

Para cada tipo de aplicação devem ser levados em consideração os aspectos construtivos do sistema, a fim de selecionar os motores a serem utilizados para rotacionar os espelhos. Motores DC são mais baratos e tem boa capacidade de gerar torque, porém, são menos precisos devido a sua alta velocidade de rotação, já os servo-motores podem ser posicionados de maneira muito precisa, mas requerem uma tecnologia mais sofisticada para seu uso, encarecendo o projeto. Pode-se ainda destacar os motores de passo, que possuem boa precisão, mas são menos capazes de ceder altos níveis de torque, sendo assim, mais recomendados para sistemas menores, com poucos espelhos (WALKER, 2013).

Para o controle dos motores de passo é necessária a ligação de cada uma de suas bobinas a fim de obter-se um passo, ou ainda, de duas bobinas adjacentes,

para se obter meio passo, como explica Goellner (2006). Esse tipo de controle pode ser feito usando-se um microcontrolador, entretanto, é necessário um *driver* de potência afim de adequar as saídas do microcontrolador às entradas do motor de passo (MANCUZO, 2018).

Com o propósito de um posicionamento do motor de passo preciso, é necessário conhecer o estado atual do sistema. Amplamente aplicados na automação industrial, os sensores são uma parte importantíssima das estruturas de controle, automação e supervisão de processos. Tendo como principal função serem os olhos e ouvidos do sistema, os sensores transformam as variáveis físicas em variáveis que sejam mais convenientes para a medição, usualmente em tensão ou corrente. Podem ser classificados em sensores analógicos ou digitais, sendo os mais utilizados na automação os sensores discretos. Com apenas dois estados, eles são usados para indicar que algum evento ocorreu.

Para ser capaz de realizar medições adequadas, é importante que se conheça as características do sensor utilizado, como a sensibilidade, o ganho, o fundo de escala, a resolução, a exatidão, a precisão, a linearidade, o *offset*, o *drift*, a repetibilidade, a reprodutibilidade, se possui ou não histerese, a banda morta, a banda de erro estático, os erros associados ao sensor e ainda como esse erro irá se propagar pelo sistema. Em alguns casos, é importante ainda conhecer as características dinâmicas do sensor e sua confiabilidade, para que se possa estimar o tempo de uso dele.

Com o objetivo de agir diretamente nas saídas do sistema, faz-se o uso dos atuadores, que são responsáveis por transformar energia elétrica em movimento, calor, pressão, posicionar ferramentas e fazer com que o sistema siga o que foi proposto pelas variáveis de entradas.

2.2.1 Sensores aplicados em concentradores solares

A fim de posicionar os espelhos do refletor para que se faça o rastreamento solar é necessária a utilização de sensores de posição. Com o grande número de sensores disponíveis no mercado, baseados nas mais diversas tecnologias, é necessário que se faça uma análise para selecionar um sensor adequado, baseando-se em suas características físicas e econômicas.

2.2.1.1 Encoders

Amplamente utilizados para medições de velocidade e/ou posição, os encoders ópticos são compostos por um disco de vidro ou plástico, uma fonte de luz e um par de fotodetectores. À medida que o disco roda, uma série de pulsos luminosos é gerada nos fotodetectores, com base na codificação do disco com setores transparentes e opacos, ou ainda, opacos e reflexivos (ROSÁRIO, 2005). É possível empregar o uso de encoders em instrumentos rotativos e em instrumentos lineares.

Os encoders são divididos em incrementais e absolutos devido a suas diferentes maneiras de operação. Os encoders incrementais tem como saída um pulso de indexação e um pulso secundário em quadratura, indicando a direção do movimento e permitindo a indicação de uma posição relativa à posição anterior do sensor. Já para encoders absolutos é possível saber a posição inicial do sistema, uma vez que cada posição angular possui um único sistema de codificação associado. Encoders absolutos são mais complexos e mais caros quando comparados aos encoders incrementais, porém, não necessitam uma inicialização de posição (NYCE, 2003).

É possível realizar a medição da orientação de um seguidor solar a partir de um encoder rotativo associado ao eixo de rotação dos espelhos. Além das dificuldades de se instalar o encoder, os encoders incrementais necessitam ainda de um microcontrolador que possa contar e armazenar os pulsos gerados e a posição atual do sistema, com o risco de perder dados em caso de falta ou falha na alimentação do circuito. (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

2.2.1.2 Inclinômetros

Outra maneira de realizar medições de ângulo é através dos inclinômetros, também conhecidos como sensores de inclinação, usualmente selados e sem partes móveis, estes sensores não se desgastam facilmente (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

Várias tecnologias são aplicadas na fabricação de inclinômetros, entre elas podemos citar a associação de acelerômetros e giroscópios para medidas mais dinâmicas de inclinação (QINGLEI *et al*, 2007) ou até mesmo o uso de fluídos ferromagnéticos (ANDÒ; ASCIA; BAGLIO, 2010), cada tecnologia com suas vantagens e desvantagens.

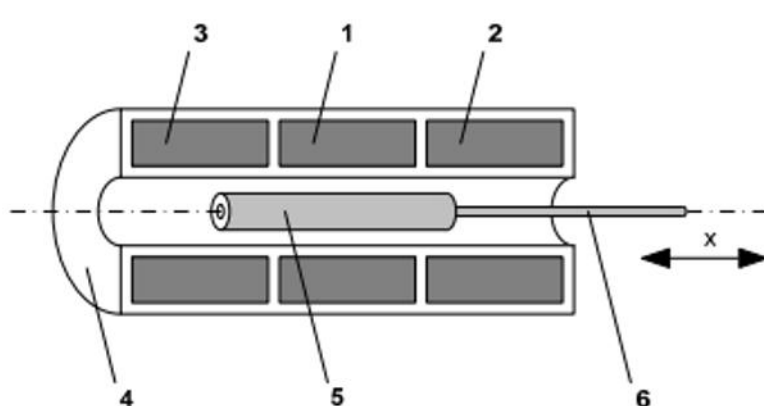
Sendo um forte concorrente dos encoders nas aplicações em painéis de concentradores solares, os inclinômetros não precisam ser acoplados às partes rotativas, facilitando sua instalação no sistema (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

2.2.1.3 Transdutor Linear Diferencial Variável (LVDT)

Um transdutor bastante utilizado em aplicações que requerem maior robustez e durabilidade é o Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT), sendo este constituído essencialmente de uma bobina primária e duas bobinas secundárias e um núcleo móvel, como pode ser observado na Figura 2. O núcleo magnético do transdutor é acoplado ao objeto que se deseja medir a distância, conforme o núcleo se move, o acoplamento entre as bobinas primárias e secundárias muda proporcionalmente (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

Fazendo uma comparação entre os sensores lineares de posição, pode-se notar as principais vantagens do LVDT, como sua longa vida útil e a alta resolução, e suas desvantagens, que seriam a dificuldade de medir-se distâncias maiores do que alguns decímetros e a dependência de um circuito de condicionamento de sinal (NYCE, 2003). Essas características tornam o LVDT uma excelente opção para algumas aplicações que requerem precisão em condições ambientais mais extremas, como na indústria nuclear, aeroespacial e em aplicações de processos químicos.

Figura 2 - Partes construtivas de um transdutor LVDT.



Legenda:

1. Enrolamento primário, P
2. Enrolamento secundário, S1
3. Enrolamento secundário, S2
4. Encapsulamento
5. Núcleo
6. Haste
- x. Deslocamento ao longo de um eixo ($-1 < x < +1$)

Fonte: Dias (2015).

Além de sua robustez, o LVDT destaca-se pela boa precisão, sensibilidade, resolução, linearidade, repetibilidade, isolamento elétrico total, ampla resposta dinâmica, ampla temperatura de operação, medição absoluta além de ter a bobina e núcleo separáveis, facilitando a manutenção (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

Para o bom funcionamento do transdutor, é necessário que seja aplicada uma tensão alternada em seu enrolamento primário e que a tensão dos enrolamentos secundários seja demodulada, de maneira que possa se relacionar a tensão de saída e a fase da portadora com a posição do núcleo do LVDT (CARVALHO, 2017).

É possível encontrar circuitos integrados que realizam a demodulação de transdutores LVDT, Dias (2015) traz o uso do NE5521D, que conta com circuito de excitação, para que seja gerada a onda de entrada do enrolamento primário e um circuito demodulador, que converte o sinal para um nível CC indicando a posição do núcleo pelo valor de tensão. O uso desse circuito integrado requer ainda mais alguns circuitos externos para que possa funcionar corretamente e possa ser interpretado por um microcontrolador.

Outra opção de circuito integrado para uso conjunto aos transdutores seria o PGA970, como traz Pelegrin (2021), um chip de condicionamento de sinal que conta com oscilador senoidal, amplificadores, filtros, conversores A/D para amostragem do sinal das bobinas secundárias e um bloco de demodulação integrado a um processador ARM-Cortex M0 que permite a adição de algoritmos de compensação e adição de protocolos de comunicação para as interfaces de comunicação presentes no chip (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Tanto Pelegrin (2021) como Carvalho (2017) apontam a viabilidade do LVDT como transdutor para monitorar o posicionamento dos refletores Fresnel linear e destacam ainda suas vantagens econômicas e a boa precisão adquirida.

2.2.2 Atuadores

Os atuadores são os componentes responsáveis por controlar e mover o sistema. O atuador recebe um sinal de controle e então interfere no sistema, de maneira que o sistema tenha a resposta desejada.

Com o surgimento dos componentes eletrônicos semicondutores e os circuitos integrados, as tecnologias eletrônicas tiveram grande avanço nas aplicações de sistemas de controle. Com características dinâmicas mais rápidas, maior escalabilidade e flexibilidade, o tratamento dos dados na forma elétrica ou digital trouxe a possibilidade de se controlar um processo em um local distante, mais precisamente e rapidamente, permitindo ainda a realização de diversas operações matemáticas para a aplicação dos algoritmos de controle, instigando assim a criação de atuadores com comando elétrico (ROSÁRIO, 2005).

A grande maioria dos atuadores elétricos são os motores elétricos, sendo eles de variados tipos, como por exemplo, motores de corrente contínua, motores de corrente alternada, motores de passo, servomotores, motores lineares, entre outros. Existem também outros atuadores elétricos para as mais diversas aplicações, como válvulas solenoides e servoválvulas para controle de vazão e pressão de fluídos e ainda os atuadores piezelétricos, que possuem um pequeno curso de movimento mas são muito precisos e rápidos e são empregados, por exemplo em microscópios e câmeras fotográficas (ROSÁRIO, 2005).

Quando se trata de sistemas de movimentação para rastreamento solar é possível notar que não há uma concordância entre os autores, alguns optam por utilizar motores de corrente contínua, enquanto outros preferem implementar seus sistemas com motores de passo, como traz Carvalho (2017).

Para a seleção do atuador, é preciso fazer um balanço entre o torque que o motor é capaz de gerar e a precisão do posicionamento atingida para que se obtenha uma maior captação de energia com o refletor. Os motores CC em geral possuem um custo mais baixo e uma boa capacidade de torque, entretanto, requerem um sistema mecânico capaz de transformar sua alta velocidade de rotação em um movimento preciso. No caso dos servo motores, possuem uma boa precisão em seu movimento e poderiam ser acoplados diretamente ao eixo, tendo como desvantagem principal a complexidade aumentada do sistema de controle utilizado e a incapacidade de realizar voltas completas. Outro tipo de atuador utilizado em sistemas de posicionamento para refletores são os motores de passo, que podem ser movimentados em ângulos específicos com uma boa precisão, mas possuem menor capacidade de torque quando comparados com os motores CC equivalentes (WALKER, 2013).

Os motores de passo são amplamente utilizados em sistemas a malha aberta, uma vez que permitem movimentos incrementais precisos. As diferentes maneiras de excitar este tipo de motor determinam o movimento angular de um passo do motor e o torque disponível. Os três modos de excitação possíveis são passo completo, meio passo e micropasso. Para se obter um passo completo se energizam as fases de forma sequencial, uma ou duas de cada vez, sendo que ao energizar duas fases simultaneamente aumenta o torque gerado. A maneira de se gerar um meio passo é energizando duas fases e então desenergizando uma. Já para o micropasso o que se faz é uma variação de energização contínua nas fases, permitindo que os passos sejam divididos quantas vezes forem necessárias em troca de aumento de complexidade e redução da precisão (CARDOZO, 2012).

2.3 Redes e protocolos de sensores industriais

Com o objetivo de ajustar constantemente a posição dos espelhos, utiliza-se dispositivos sensores que adquirem os dados do sistema e os repassam aos dispositivos de controle, que possuem a função de realizar operações lógicas e matemáticas para que possam devolver instruções ao sistema de acordo com o que foi programado (ROSÁRIO, 2005). Para que exista esta troca de dados entre as diversas partes do sistema, faz-se o uso de uma rede de comunicação entre os dispositivos, capaz de integrar vários sensores e controladores a um sistema supervisor.

Alguns dos fatores que ditam o comportamento da rede são a sua topologia ou modo como é realizado o enlace físico entre os diversos módulos processadores e o protocolo ou o conjunto de regras da organização da comunicação. Quanto as topologias de redes locais, é comum encontrá-las com ligações em estrela, anel, barramento, árvore ou em alguma mistura entre as diversas formas.

As redes ligadas em estrela possuem um nó central ou um mestre da rede que se comunica com todos os outros nós, também chamados de escravos, trazendo a possibilidade de integrar diferentes tipos de protocolos e velocidades de conexão. Ainda, caso ocorra falha em um nó escravo, somente este nó perderá a capacidade de comunicar-se, porém, caso essa falha seja no nó mestre toda a rede terá problemas (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Nas redes de topologia em anel, a comunicação é unidirecional e as mensagens são repetidas de uma estação de trabalho para a seguinte até que a

mensagem seja retirada da rede por um receptor apropriado, sendo ele o destino da mensagem, ou o dispositivo que tentou transmiti-la ou ainda um gerenciador que ao ver uma mensagem repetida a remove da rede. Devido a ligação sequencial dos dispositivos, a falha em um dos nós da rede compromete a comunicação de todos os demais dispositivos, tornando-a menos robusta. (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

O mesmo não ocorre em redes ligadas em barramento, onde todos os dispositivos recebem as mensagens que são enviadas por um dos nós, esta topologia apresenta uma grande robustez, apresentando problemas apenas quando o barramento é partido. Tamanha vantagem traz consigo um aumento de complexidade de *software*, uma vez que cada um dos dispositivos deve ser capaz de reconhecer as mensagens enviadas para si e ainda, ao tentar enviar uma mensagem, verificar se o barramento se encontra disponível (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Como uma ramificação da topologia de barramento, as redes que adotam da topologia de árvore possuem vários barramentos interconectados, com um barramento principal e suas derivações, contando com alta confiabilidade. Assim como a topologia de barramento, as redes em árvore trazem um aumento ainda maior na complexidade, devido as possíveis diferenças de tempo de propagação entre o barramento principal e suas derivações (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Para tratar da interconexão de sistemas abertos, o modelo OSI/ISO foi criado. Este modelo é composto por camadas com funções bem definidas, onde cada nível conversa horizontalmente, sem se preocupar com o que as camadas inferiores fazem com os dados. Albuquerque e Alexandria (2009) apresentam as sete camadas presentes no modelo OSI/ISO:

Camada 1 – Camada física: Comunicação elétrica, como são transmitidos os bits brutos, tipo de cabeamento, níveis de tensão para representar os bits e o sentido de transmissão, adaptar o sinal ao meio de transmissão utilizado.

Camada 2 – Camada de enlace: Detecção e correção de erros, controle do fluxo de dados, controle de acesso ao meio, endereçamento físico das máquinas.

Camada 3 – Camada de rede: Caminho seguido pelos dados, conexão entre equipamentos, levar os dados da origem até seu destino.

Camada 4 – Camada de transporte: Oferece suporte adicional para a transmissão de dados por meio da rede onde o protocolo de rede não pode garantir a completa entrega dos dados.

Camada 5 – Camada de sessão: Permite trabalhar com estruturas de dados de nível mais alto, como por exemplo, transferências de arquivos, permitindo que a transmissão seja reiniciada, mesmo que a conexão tenha sido perdida em níveis mais baixos. Sincronização entre as máquinas.

Camada 6 – Camada de apresentação: Responsável pela interpretação dos dados, conversão de diferentes códigos e linguagens. Criptografia, embaralhamento e compressão/descompressão

Camada 7 – Camada de aplicação: Realiza o contato com o usuário, podendo ser um correio eletrônico ou o controle de um processo.

Esta organização em camadas permite que a rede seja composta de vários sistemas e subsistemas fazendo uso das informações que trafegam de diferentes maneiras. Com isso, se torna mais fácil modularizar a comunicação, além fazer com que as mudanças de camadas ocorram sem prejudicar as informações contidas em outras camadas.

As principais funções do mestre da rede consistem em controlar e gerenciar a rede e centralizar os dados do sistema. Além disso, pode servir como interface de comunicação com sistemas supervisórios, interface de operação remota, gerenciando a rede de comunicação, sincronizando os sistemas, executando os comandos da rede e realizando operações matemáticas mais complexas. Enquanto os escravos têm como função receber as informações do mestre e aplicá-las nas tarefas locais da melhor maneira possível. É possível que os escravos façam operações de controle, tratamento de sinais e manipular os eventos de forma predeterminada localmente. Escravos e mestres podem possuir as mesmas capacidades técnicas, o que difere os dois é a capacidade de comunicar-se com outros escravos ou com outros níveis da rede (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Com a crescente necessidade de se transmitir informações entre diversos aparelhos, a distância percorrida pela informação foi aumentando, trazendo mais custo e dificuldade para a comunicação de informações paralela. O custo e a dificuldade de transmitir-se dados por algumas dezenas de metros com cabos de 10 vias seria muito grande, a fim de atender essa necessidade foi criada a comunicação

serial, que nada mais é do que um caso particular da comunicação paralela, onde transmite-se apenas um único bit por vez, e cada caractere sequencialmente (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Para que se estabeleça uma rede de comunicação, é comum o uso de protocolos e padrões normatizados que se adequem à aplicação de interesse (MORAES; CASTRUCCI, 2007). Um protocolo de comunicação industrial comumente utilizado é o MODBUS, criado em 1979 pela Modicom, que permite a integração de inúmeros equipamentos variados e de diferentes fabricantes, mantendo a compatibilidade da troca de mensagens, como afirma Jahno (2016). Protocolos de comunicação industrial são amplamente aplicados devido a sua robustez e confiabilidade, além de tornarem a ampliação do sistema bastante fácil (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Os protocolos do tipo MODBUS são tipicamente utilizados em redes de comunicação entre dispositivos onde se tem um sistema, do tipo SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (ASSUNÇÃO, 2016).

2.3.1 Protocolos de Redes Industriais

O surgimento de redes locais, redes corporativas e redes industriais trouxe consigo a necessidade de trabalhar em tempo real e com alta confiabilidade. Com isso, a busca por aumentar a quantidade de informação que trafega por estas redes e a segurança destes dados, visto que o número de sensores e atuadores conectados a ela vêm aumentando, os estudos sobre diferentes topologias de redes e a criação de diversos protocolos de comunicação foram impulsionados. Atualmente com a alvorada da Indústria 4.0 e o desenvolvimento do mercado de *smart houses*, a importância de se ter também interoperabilidade entre diversos sistemas e sensores, e opções *plug and play* de rápida instalação é evidente.

Com o objetivo satisfazer tais requisitos, várias empresas do ramo de automação industrial começaram a trabalhar na padronização da comunicação de dispositivos e disponibilizá-los para outros fabricantes de áreas correlatas. Desta forma, nasceram os protocolos de comunicação industrial.

De acordo com Albuquerque e Alexandria (2009), podemos definir os Protocolos de comunicação industrial como um conjunto de convenções e

procedimentos que regulamentam a transmissão de dados entre diferentes equipamentos.

Durante algum tempo, cada equipamento industrial possuía a habilidade de trocar informações apenas com equipamentos que fossem de seu próprio fabricante, criando barreiras de entrada para pequenas marcas e novos produtos, além de dificuldades de manutenção e substituição de peças para seus clientes, criando uma solução que vinha acompanhada de um problema futuro. Com o passar do tempo, algumas empresas em conjunto se organizaram e começaram estruturar as redes industriais, criando interoperabilidade por meio de protocolos compartilhados que aos poucos foram então se tornando protocolos abertos geridos por grupos especializados no assunto (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

2.3.1.1 Profibus

O Profibus, acrônimo para *Process Field Bus*, faz parte de um grupo de protocolos abertos não proprietários que busca trazer as redes industriais a possibilidade de interconexão entre equipamentos de diferentes fabricantes. Projetado para atender equipamentos e sistemas de controle que se comuniquem com dispositivos distribuídos, a estrutura do protocolo Profibus-DP é feita sob as camadas do modelo OSI, fazendo uso da camada física e a camada de enlace e adicionando uma camada de interface com o usuário, não utilizando as camadas entre a terceira e a sétima, garantindo transmissões de alta velocidade (ZHOU *et al*, 2017).

Nas redes Profibus, assim como ocorre em outras redes de transmissão serial, é necessário que se selecione o comprimento da linha de transmissão a partir da taxa de dados selecionada para transmissão. Para redes mais curtas, de mais ou menos 100 m, deve ser possível alcançar taxas de transmissão de até mesmo 12 Mbps. Enquanto para redes longas de até 1200 m a taxa de transmissão é limitada a 9,6 kbps (CHEN; LI; WANG, 2012).

Com controle de acesso à rede por meio de um “*Token*”, a rede Profibus permite que sejam conectados diversos mestres a uma mesma rede e que esses trabalhem de maneira cooperativa, dividindo o direito de acesso dentro das especificações de tempo. Com possibilidade de utilizar-se em diferentes perfis de comunicação, é comum encontrar-se o Profibus-PA em sistemas completos de

automação e controle, uma vez que o Protocolo abrange todos os níveis por meio de suas variações (ASSOCIAÇÃO PROFIBUS BRASIL AMÉRICA LATINA, 2012).

2.3.1.2 CAN

Inicialmente projetada pela Bosch para simplificar o cabeamento utilizado em carros e substituir os primeiros sistemas conectados ponto a ponto. Com cada vez mais dispositivos eletrônicos e controladores conectados, a complexidade da fiação dos veículos foi crescendo, tornando o sistema cada vez mais difícil e caro para as indústrias do ramo. Sendo assim, a substituição destas conexões por redes de comunicação foi acontecendo gradualmente e com a chegada das redes CAN, que provinham aos sistemas uma alternativa de comunicação robusta, de baixo custo e com uma maneira muito eficiente de controle de acesso, por meio dos bits de arbitração presentes no protocolo (OTHMAN *et al*, 2006).

Construída sob os modelos tradicionais OSI e IP, as redes CAN são compostas por 4 camadas, a física, a de transferência, a de objeto e a de aplicação. Isso, aliado a não dependência de um nó específico que seu sistema de arbitração e endereçamento trazem, tornam-na muito robusta e amplamente utilizada (OTHMAN *et al*, 2006). Atualmente, as redes CAN vem ganhando cada vez mais espaço em outras áreas, como a automação industrial, aplicações marinhas, aeronáuticas e na agricultura, entre outras.

Sendo estruturada sobre uma comunicação serial de alta velocidade, as redes CAN foram projetadas para serem robustas, eficientes e baratas na ligação dos sensores e dos atuadores. A partir de pares trançados de fios condutores, é possível conectar mais de 40 dispositivos em uma mesma rede com taxas de transmissão de até 1 Mbit/s (OTHMAN *et al*, 2006).

2.3.1.3 MODBUS

Criado pela empresa MODICON para uso proprietário em produtos de automação industrial, o protocolo MODBUS começou a ser utilizado por outras empresas, sob autorização da própria MODICON e passou a ser um protocolo aberto. Baseado no modelo mestre-escravo, onde de maneira geral o mestre faz a requisição de uma informação sobre os dados na memória dos escravos, todos os dispositivos são ligados a uma rede bidirecional, necessitando assim que cada

escravo possua um endereço único para ser acessado. Todos os escravos recebem as requisições, mas somente o dono do endereço responde a requisição (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

O mestre inicia uma troca de informações enviando uma requisição para a rede. Então, o escravo destinatário interpreta a mensagem e envia uma resposta. As mensagens do protocolo são constituídas por conjuntos de caracteres hexadecimais ou ASCII, podendo ter entre menos que 10 até 256 bytes (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

O MODBUS usa transmissão serial de sinais, geralmente aplicando o padrão RS-485 na camada física, permitindo a transferência de dados e longas distâncias e com baixo custo estrutural (YUE, 2020).

Os padrões RS485 e RS232 estabelecem parâmetros elétricos de interfaces de comunicação serial entre dispositivos. Usados para estabelecer os padrões de taxa de transmissão, comprimento de cabos, níveis de tensão, dispositivos a serem conectados, entre outros (SHARMA; AIRAN; SHAH, 2021).

Em interfaces de comunicação serial, é comum adotar-se o protocolo MODBUS RTU (Remote Terminal Unit). Para que seja possível conectar um número maior do que 247 dispositivos, faz-se o uso de uma rede TCP/IP, podendo estar conectada à internet (SHARMA; AIRAN; SHAH, 2021).

Sharma, Airan e Shah (2021) apontam que o protocolo MODBUS RTU é aplicado às camadas de transporte e aplicação. Ainda, os autores afirmam que o MODBUS RTU é usado extensivamente em aplicações industriais para conectar dispositivos de instrumentação e equipamentos de automação industrial, pela sua simples linguagem.

O quadro de mensagem do protocolo MODBUS RTU possui um endereço de 8 bits, permitindo assim a conexão de até 247 dispositivos com endereços entre 1 e 247, sendo o endereço '0' para enviar uma mensagem a todos os dispositivos conectados à rede e os outros endereços ficam reservados. O código da função também é de 8 bits e é composto por comandos de leitura/escrita como apresentado no quadro 1. Após isso, têm-se os dados que estão sendo transmitidos, que podem variar de 0 a 252 bytes. Para garantir uma maior robustez da comunicação, utiliza-se uma técnica de checagem de erro chamada de *Cyclic Redundancy Check* (CRC), que é baseada em uma divisão polinomial da soma dos caracteres enviados na rede, onde a do protocolo MODBUS é de 16 bits (SHARMA; AIRAN; SHAH, 2021).

Quadro 1: MODBUS código de funções

<i>Function code</i>	<i>Register Type</i>
1	<i>Read Coil</i>
2	<i>Read Discrete Input</i>
3	<i>Read Holding Registres</i>
4	<i>Reand Input Registers</i>
5	<i>Write Single Coil</i>
6	<i>Write Single Holding Register</i>
15	<i>Write Multiple Coils</i>
16	<i>Write Multiple Holding Registers</i>

Fonte: Sharma, Airan e Shah (2021)

O endereço da mensagem presente no cabeçalho serve para que os dispositivos escravos da rede saibam qual deve responder à mensagem. Os usuários da rede com endereços diferentes do solicitado simplesmente ignoram a mensagem.

O formato dos dados enviados pelos escravos pode ter quatro tipos de informação, onde duas são responsáveis por atributos discretos, representando ligado ou desligado, e são comumente chamados de bobinas ‘coils’. Existem ainda os chamados registradores, que servem para guardar valores numéricos de 16 bits que são chamados de registradores. O código de função presente na mensagem serve para especificar o comando enviado pelo mestre, conforme ilustrado no Quadro 1. Caso o escravo receba o comando sem detectar nenhum erro, este responde a requisição com o mesmo código. Caso um erro seja detectado, o escravo responde com o mesmo código, porém com o MSB setado para 1.

O código de função serve para dar instruções do tipo escrever um valor em uma bobina ou em um registrador e para ler valores de registradores e bobinas. Também pode ser usado para ler múltiplas bobinas ou registradores em uma única mensagem. Os campos de dados da mensagem enviada pelo mestre contêm o endereço do primeiro registrador a ser lido ou alterado e o número de registradores ou bobinas que serão lidos ou escritos (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Quadro 2: Formato do telegrama (frame) usado no MODBUS-RTU

Endereço	Função	Dados	CRC
-----------------	---------------	--------------	------------

8 Bits	8 Bits	N x 8 Bits	16 Bits
--------	--------	------------	---------

Fonte: Albuquerque e Alexandria (2009)

O MODBUS-RTU tem um pacote mais otimizado, transmitindo mais informações com menos bytes, utilizando uma mensagem mais compacta. Já no MODBUS TCP, os dados são encapsulados de modo a serem transmitidos usando o meio físico *Ethernet* (IEEE 802.3), acrescentando novas funções em outras camadas do protocolo, e fazendo o uso de técnicas próprias da rede *Ethernet*. Dessa forma, possibilita que dispositivos se conectem mais facilmente, além de permitir que haja mais endereços e que as velocidades de transmissão sejam muito maiores (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Albuquerque e Alexandria (2009) ainda apontam que os tempos de espera entre dois bytes de uma mesma mensagem do protocolo MODBUS RTU não deve ser maior do que 1,5 tempos de byte. Para duas mensagens diferentes enviadas consecutivamente, o tempo entre as mensagens deve ser de pelo menos 3,5 tempos de byte. Essas regras fazem com que a detecção de início e fim de mensagem sejam mais fáceis. É ainda necessário configurar um tempo máximo para que o mestre aguarde a resposta do escravo, caso o escravo não responda dentro desse tempo, o mestre poderá realizar outra tentativa de comunicação.

Para aplicações de monitoramento de sensores à distâncias longas ou outras aplicações onde não se necessita uma grande largura de banda para transmissão de dados via cabo, o protocolo MODBUS RTU é uma boa alternativa. Seu baixo custo de desenvolvimento, como protocolo aberto, além da robustez na transmissão de informações e sua ampla disseminação na indústria, o tornam um protocolo adequado para a aplicação proposta nesse trabalho.

2.4 Sistemas supervisórios

O termo controle supervisório se dá ao processo de monitorar à distância uma atividade, enviando as diretrizes de operação e recebendo a indicação de que as ações de controle foram executadas (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Os sistemas supervisórios são utilizados em processos que buscam maior segurança dos operadores do sistema e, também, uma maior capacidade de acompanhamento dos processos (SILVA, 2017) por meio de uma interface homem-

máquina. Esse tipo de sistema possibilita a inclusão de um microcomputador, responsável pela interface, ao sistema de controle, que tem como principais tarefas o controle estatístico do processo, bem como a geração de uma tela gráfica representando o processo e seus parâmetros para que o operador tenha fácil acesso aos dados da planta (PEREIRA, 2003). Estes sistemas são aplicados aos mais diversos processos, desde pequenos sistemas de sensoriamento, até painéis de controle de grandes empresas de distribuição de energia e servem como interface entre os operadores e os sistemas de controle (LEME et al, 2016).

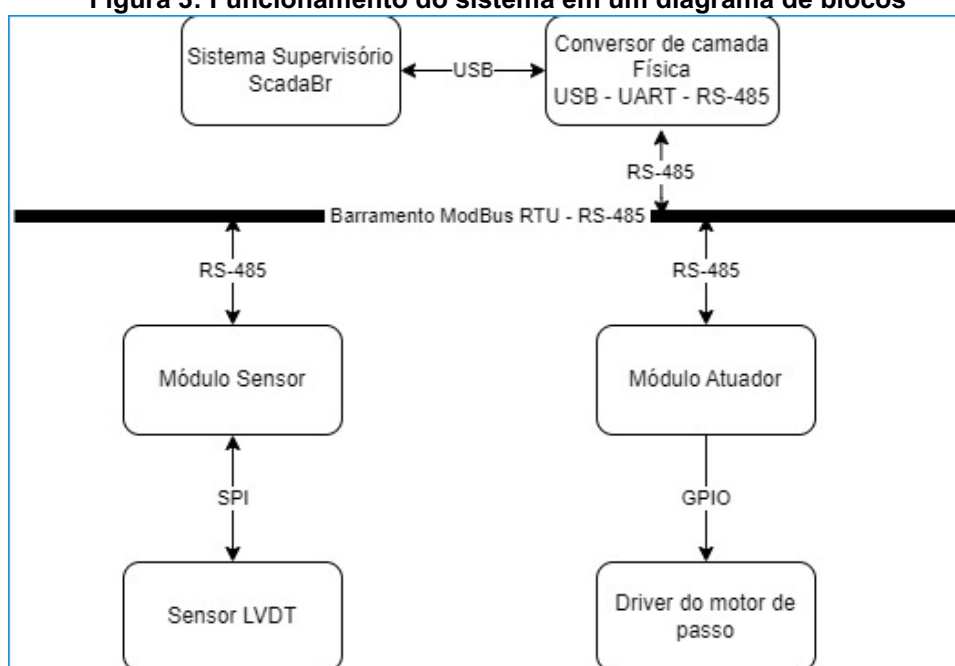
Os sistemas supervisórios podem ser compostos por inúmeras unidades de processamento, que coletam os dados no campo e os enviam a uma estação central por meio de um sistema de comunicação. Nessa estação central, os dados se tornam informações que permitem ao operador tomar uma decisão e executar tarefas de controle remotamente. As unidades remotas podem combinar inúmeras funções, como entradas e saídas digitais e analógicas, malhas de controle, sistemas de comunicação e memória de dados em um mesmo dispositivo. Ao sistema supervisório fica então a função de coletar os dados do sistema atual e então exibi-los como uma informação em uma sala de controle, com uma arquitetura muito semelhante a um sistema de controle distribuído. Os sistemas supervisórios permitem que os componentes estejam geograficamente espalhados por uma vasta região, e ainda assim, ligados a uma mesma rede local (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Um exemplo de sistema supervisório é o ScadaBr que é um *software* de código aberto, desenvolvido por meio de uma parceria entre diversas instituições, que permite o desenvolvimento de aplicações automatizadas para vários ambientes. Esse programa tem como principais características a geração de gráficos e relatórios e a comunicação em mais de 20 protocolos, incluído o MODBUS (SILVA et al, 2013).

3 MATERIAS E MÉTODOS

O sistema proposto no presente trabalho, suas partes e seu funcionamento serão brevemente explicados na sequência deste Capítulo. Apesar da aplicação do referido sistema ser voltada a concentradores solares, a demonstração de sua implementação e funcionamento foi feita em bancada, utilizando um sensor LVDT previamente desenvolvido, um motor de passo e driver para exemplificar a atuação no ajuste da inclinação de um painel concentrador. De acordo com a Figura 3, o sistema compreende um módulo sensor que realiza a leitura de um sensor LVDT, um módulo atuador para controlar um motor de passo, uma rede física no padrão RS-485 conectando esses módulos a um conversor de camada física que permite a comunicação com um sistema supervisório instalado em um computador.

Figura 3: Funcionamento do sistema em um diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria (2022)

O sistema de controle se deu sob uma rede MODBUS, que tem como principal função concentrar os dados no sistema supervisório e direcionar as informações necessárias para que os espelhos sejam corretamente posicionados. Cada nó da rede é composto por um sistema microcontrolado que tem algumas funções específicas que serão melhor detalhadas posteriormente. A fim de compor

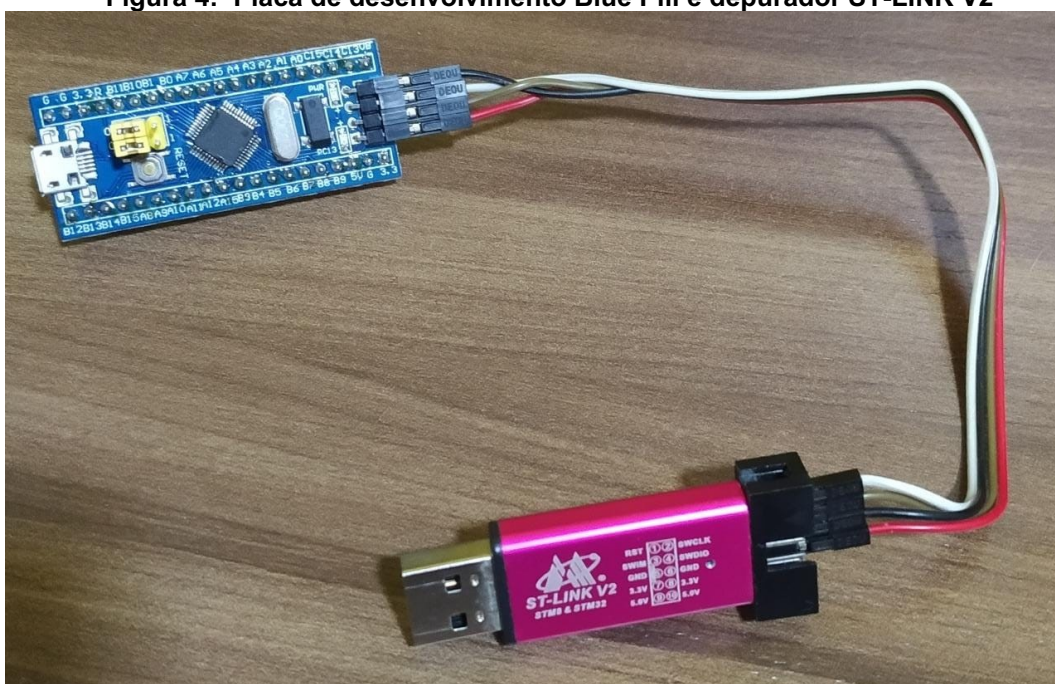
tal sistema, foram utilizados diversos *softwares* de desenvolvimento, componentes eletrônicos, sensores e atuadores que serão especificados na sequência.

3.1 Microcontrolador STM32F103 e placa Blue Pill

O microcontrolador STM32F103C8T6 de 32 bits da fabricante STMicroelectronics® conta com um processador ARM Cortex-M3, capaz de operar com *clocks* de até 72 MHz, além de contar com 64 kB de memória Flash e 20 kB de memória SRAM. Além disso, possui diversos periféricos, como 4 portas GPIO, 3 USARTs 2 controladores I2C, 2 controladores SPI, 2 ADCs de 12 bits e até 16 Canais, 2 canais de DMA, 4 temporizadores, 1 controlador USB, 1 controlador CAN e uma unidade de cálculo de CRC (STMicroelectronics, 2022).

A placa de desenvolvimento modelo Blue Pill, ilustrada na Figura 4, além de abrigar o microcontrolador STM32F103C8T6, traz ainda a conexão com o microcontrolador pelas suas barras de pinos laterais. Além da opção de alimentação por um conector micro USB e um regulador de tensão presente que faz a adequação do nível de tensão para o microcontrolador. O kit conta também com um LED de indicação de alimentação, um LED controlado pelo microcontrolador, e oscilador externo de 8 MHz.

Figura 4: Placa de desenvolvimento Blue Pill e depurador ST-LINK V2



Fonte: Aatoria própria (2022)

3.2 Motor de passo e circuito de acionamento

O Motor de passo modelo 28BYJ-48 de quatro fases é utilizado em uma ampla gama de aplicações de bancada mais simples devido ao seu baixo consumo e opção de operação com alimentação de 5 V, tornando tais motores boas opções para realização de testes em bancadas e simulações de sistemas. Estes motores possuem uma caixa de redução interna, aumentando assim sua capacidade de gerar torque, mas conseqüentemente diminuindo sua velocidade de rotação e aumentando o número de passos necessários para se completar uma volta para aproximadamente 4096 passos (KIATRONICS, 20?).

É comum ver tal motor associado à um módulo de driver ULN2003 que é composto por um circuito integrado ULN2003 feito de drivers de transistores *Darlington* capazes de realizar o acionamento de cargas indutivas. Além disso, essa placa de circuito impresso (PCI) conta com LEDs indicadores de funcionamento para cada saída ligada a uma bobina, tornando o funcionamento do motor algo mais visível, como pode ser visto na Figura 5. Ele ainda apresenta a opção de alimentar este sistema com tensões de 5 a 12 Volts e acionar as bobinas do motor por meio das GPIOs do microcontrolador, uma vez que o ULN2003 aceita entradas tanto TTL quanto CMOS (TEXAS INSTRUMENTS, 2022).

Figura 5: Motor de passo e circuito de driver



Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 Sensor LVDT

O sensor LVDT utilizado é resultado de trabalhos anteriores, como o de Pelegrin (2021) e Carvalho (2017), contando com contribuições relevantes do autor da presente monografia de TCC no desenvolvimento da placa de circuito impresso e no desenvolvimento do *firmware* utilizado para instrumentação do sensor. O referido sensor é composto por um transdutor LVDT e uma placa de instrumentação baseada no *Analog Front-End* modelo PGA970, em um microcontrolador STM32F103C8T6, mostrados na Figura 6. O autor deste trabalho de TCC atuou no desenvolvimento do *firmware* para configuração e calibração do PGA970, do *firmware* do microcontrolador para leitura do PGA970 e de uma PCI para o circuito completo de instrumentação. Tais ferramentas foram utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho de Pelegrin (2021) para a montagem do sensor e avaliação de seu funcionamento.

Figura 6: Sensor LVDT e PCI de instrumentação.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.4 CI de interface física RS-485

As adaptações de sinais entre as interfaces físicas padrões UART e RS-485 foram realizadas pelo dispositivo THVD1520, fabricado pela Texas Instruments®. Esse CI exige uma única tensão de alimentação, provê proteção contra surtos de

tensão no barramento, rejeição de ruído e um sistema antifalha de ligamento e desligamento, permitindo que os nós sejam ligados e desligados da rede em qualquer momento, sem gerar falhas na rede (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

3.5 Ambiente de desenvolvimento integrado STM32cubeIDE

A ferramenta de desenvolvimento disponibilizada pela STMicroelectronics® é utilizada para criação do *firmware* responsável pelos algoritmos de operação dos microcontroladores presentes na rede de comunicação.

A ferramenta STM32cubeIDE é uma plataforma de desenvolvimento em C/C++ com configuração de periféricos, geração de códigos, compilação de códigos e ferramentas para depuração de microcontroladores e microprocessadores da família STM32. Baseado no *framework* Eclipse/CDT, GCC *toolchain* compilação e GDB para depuração, a ferramenta também permite a integração com diversos *plugins* que complementam as funções de uma IDE baseada em Eclipse (STMicroelectronics, 20?).

3.6 ScadaBr

O ScadaBr é uma aplicação multiplataforma que, a partir de um servidor de aplicações, pode ser facilmente acessado por meio de um navegador de Internet e permite a visualização de variáveis, criação de gráficos, análise de estatísticas, além de configurações de alarmes e construções de interfaces homem-máquina. (SCADABR, 2010). Além disso, a partir do registro contínuo dos dados, é possível analisar dados de vários períodos de operação. Portanto, os sistemas supervisórios são um grande aliado dos responsáveis por otimização de processos e sistemas de controle.

Por ser um *software* livre, gratuito e de código-fonte aberto, o ScadaBr tem como seu público-alvo as universidades, permitindo o desenvolvimento de aplicações de automação, aquisição de dados e controle supervisorio sem custos para estudantes e membros da universidade que tenham interesse no assunto. Com a proposta de dar total liberdade ao desenvolvedor do sistema, o *software* conta com diversas ferramentas e bibliotecas, dando suporte a um amplo número de protocolos de comunicação para a aquisição de dados e permitindo que os dados sejam

apresentados por meio de tabelas ou ainda telas gráficas desenvolvidas pelo usuário (SCADABR, 2010).

Além disso, o *software* conta também com outras funcionalidades presentes em sistemas supervisórios, como gerenciamento de usuários e permissões de acesso, geração de relatórios e criação de histórico, automação de processos com diversos gatilhos, alarmes por e-mail e SMS, e muitas outras funcionalidades (SCADABR, 2010).

3.7 Escravos MODBUS

Para realizar as operações relacionadas ao MODBUS nos dispositivos escravos da rede, utilizou-se uma biblioteca disponível no repositório do *github* de Alejandro Mera (alejoseb). Uma vez que esta biblioteca foi desenvolvida para microcontroladores da STM32 e a possui um exemplo para o STM32F103, seu uso se torna simples a partir de pequenas alterações, como a alteração do pino direção utilizado nos conversores seriais para RS-485, do ID de cada um dos terminais e da taxa de transmissão. Esta biblioteca foi construída sob o freeRTOS (*free Real-Time Operating System*), permitindo assim que se possa organizar o código a ser executado nos microcontroladores em tarefas que serão executadas concorrentemente.

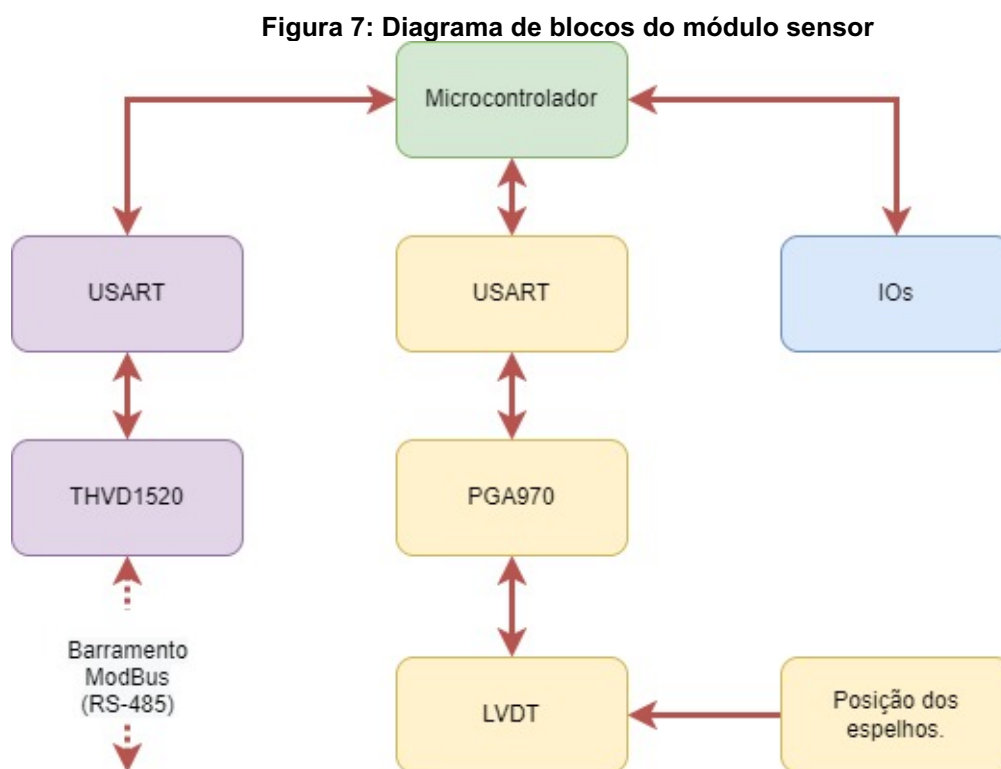
A fim de testar o funcionamento da rede, foi feita a concatenação de uma tarefa com os dados do MODBUS RTU de cada um dos escravos. Esta tarefa periódica leu o valor do registrador de endereço zero e então colocou a porta do kit de desenvolvimento ligada ao LED no estado correspondente, sendo o valor zero do registrador correspondente ao LED desligado e 1 no registrador correspondendo ao LED ligado.

3.8 Módulo sensor

Para a integração do sensor LVDT ao sistema, foi desenvolvida uma aplicação sob um microcontrolador da família STM32F103. Esta aplicação serviu como um terminal escravo da rede MODBUS que armazena os dados referentes a posição do espelho medida pelo sensor LVDT.

O terminal responsável pelo sensoriamento da posição dos espelhos e transmissão dos dados pela rede deve ser capaz de ler as informações de inclinação

transmitidas pelo PGA970 por meio da interface de comunicação SPI presente no sensor de inclinação dos espelhos e escrevê-las nos registradores que serão acessados pela tarefa responsável pelo MODBUS no sistema operacional de tempo real. O diagrama de blocos presente na Figura 7 representa este sistema e o fluxo de informações.



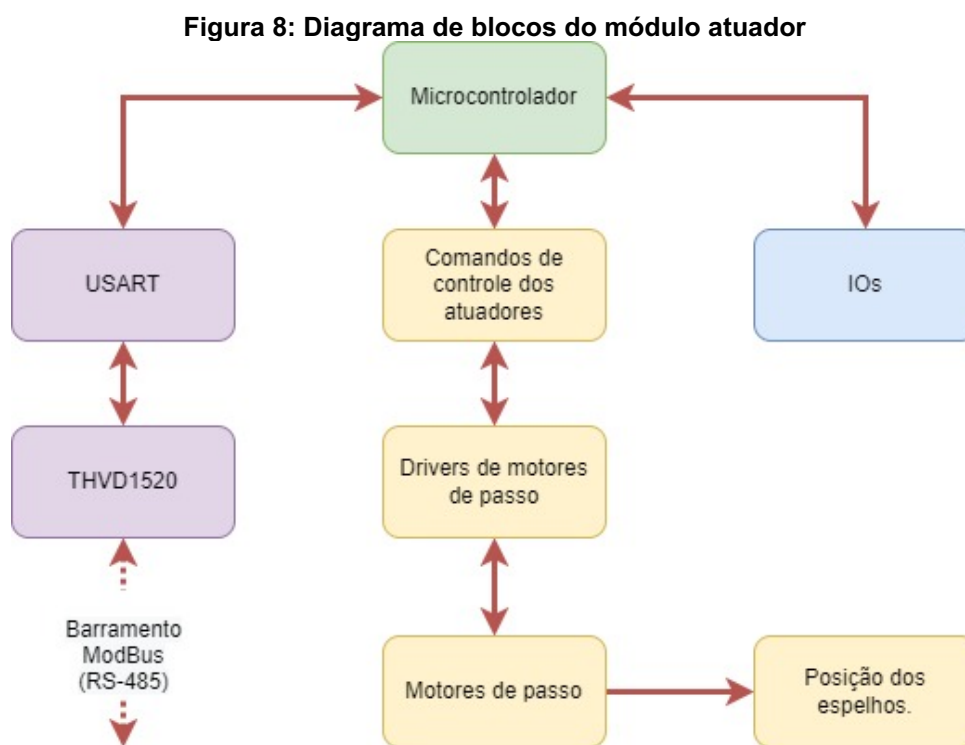
Fonte: Autoria própria (2022)

Foi criada uma tarefa responsável pela leitura do ângulo de posicionamento do sistema a partir do LVDT. O sensor montado por Pelegrin (2021) em seu trabalho já contava com um microcontrolador STM32F103C8T6, este código foi portado para o microcontrolador do módulo sensor. A tarefa deve integrar as leituras periódicas feitas pela interface SPI, a transformação dos dados lidos em ângulo e a escrita desses dados no registrador cinco do MODBUS.

3.9 Módulo atuador

Este módulo foi o responsável pelo controle do motor de passo, e conseqüentemente por posicionar corretamente os espelhos. Isso serviu como um terminal escravo da rede MODBUS e foi uma aplicação desenvolvida sob os microcontroladores da família STM32F103. Esta aplicação contou com um sistema

operacional de tempo real e tarefas concorrentes de controle do motor e controle do terminal MODBUS. O diagrama apresentado na Figura 8 mostra como ocorreu o fluxo de informações neste terminal.



Fonte: Autoria própria (2022)

A criação da tarefa responsável pelo controle do atuador do sistema foi feita em pequenos passos. Inicialmente, foi feita uma função simples, responsável por acionar as bobinas sequencialmente, a fim de se obter meio passo. Após isso, foi adicionada uma função capaz de selecionar o número de vezes que as bobinas serão acionadas, controlando assim a quantidade de passos dados pelo motor. Na sequência, se implementou o cálculo de quantos passos devem ser dados para se atingir o ângulo desejado. E por fim, foi feita uma sequência de ativação negativa das bobinas, de modo que atuador seja capaz de fazer correções em ambos os sentidos de rotação.

Após ser garantido o correto funcionamento do motor de passo deve-se integrá-lo a rede MODBUS. Foi então criada uma tarefa, onde o módulo atuador deve ler periodicamente os registradores que contém os dados de ângulo atual do sistema, ângulo desejado e velocidade de rotação informados pelo mestre da rede.

3.10 Conversor RS-485 para USB

O adaptador de interface serial UART no padrão RS-485 para interface USB consiste em um terminal da rede que tem como função ler os dados da rede MODBUS e transmiti-los para o sistema supervisorio e vice-versa a partir de uma conexão USB.

Este terminal foi desenvolvido sobre os microcontroladores da família STM32F103 fazendo o uso de um sistema operacional de tempo real, onde foram instaladas tarefas concorrentes para recepção e transmissão por meio de cada uma das interfaces de comunicação necessárias.

Para a realização da conversão de camada física dos dados presentes na rede RS-485 e envio ao sistema supervisorio foi utilizado um microcontrolador com duas diferentes portas de comunicação, uma porta de comunicação UART, associada a um pino de direção da comunicação, conectado ao circuito conversor de TTL para RS-485 conectado à rede MODBUS. Foi também usada a porta de comunicação serial USB através do *middleware* fornecido pela STM32 em sua plataforma de desenvolvimento. Com ambas as portas configuradas e habilitadas o microcontrolador foi o responsável por enviar todos os dados que chegam pela porta serial USB para a porta UART e todos os dados que chegam pela porta UART para a porta serial USB. Devido aos diferentes tempos de transmissão de cada uma das interfaces de comunicação, foram utilizados dois *Stream buffers*, que são elementos próprios do FreeRTOS para a comunicação entre duas diferentes tarefas. Os dados que chegam ao microcontrolador devem ser colocados em suas devidas filas durante uma interrupção do sistema, e tarefas concorrentes criadas sob o sistema operacional de tempo real foram encarregadas de removê-las da fila de recepção adequada e direcioná-las a porta de saída contrária à de sua chegada, ou seja, os bytes recebidos pela porta USB serão enviados para a porta UART e vice-versa.

3.11 Sistema Supervisorio

Assim que a conexão entre a rede MODBUS e o computador pessoal ficou pronta, partiu-se para as configurações do sistema supervisorio. Inicialmente foi necessário realizar o processo de adição da rede MODBUS ao ScadaBr. Chamado pelo sistema de adição de *data source*.

Foi necessário fazer as configurações relacionadas a comunicação serial da rede, como taxa de transmissão, controle de fluxo de dados, paridade, número de bits enviados, bits de parada e o tipo de codificação dos dados. Algumas configurações sobre os escravos ligados a rede, como o número máximo de leitura e escrita de registradores e bits. Configurações de acesso à rede, como tempo de espera de resposta, número de tentativas de requisição de dados e o intervalo entre as requisições de dados pelo sistema supervisorio. Além da configuração de alarmes para eventos caso haja problemas da leitura e escrita nesta *data source*. As configurações utilizadas podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9: Configuração de *data source*

Propriedades do Modbus serial

Nome: ModBus_Serial_COMPORT

Export ID (XID): DS_052154

Período de atualização: 5 segundo(s)

Quantização:

Timeout (ms): 500

Retentativas: 2

Apenas quantidades contíguas:

Criar pontos de monitor de escravo:

Máxima contagem de leitura de bits: 2000

Máxima contagem de leitura de registradores: 125

Máxima contagem de escrita de registradores: 120

Porta: COM4

Baud rate: 38400

Controle de fluxo de entrada: Nenhum

Controle de fluxo de saída: Nenhum

Data bits: 8

Stop bits: 1

Paridade: Nenhuma

Codificação: RTU

Echo: Desligado

Simultaneidade: Função

Níveis de alarme de eventos

Exceção de data source: Urgente

Exceção de leitura de data point: Urgente

Exceção de escrita em data point: Urgente

Fonte: Autoria própria (2022)

Com a rede conectada ao sistema supervisorio, foi possível então criar o que é chamado pelo ScadaBr de *data point*, que nada mais é do que o “local” exato de onde deseja-se ler um dado da rede, as configurações dos *data points* podem ser vistas na Figura 10. Para que o valor desejado seja lido é necessário configurar o ID do escravo, a faixa de registro, o tipo de dado que será lido e o *offset* do dado na memória, além de algumas outras opções que servem para tratar algumas especificidades. Foi possível ainda fazer conversões triviais, por meio de um valor multiplicador e um valor aditivo configurável ao *data point* de modo que valores numéricos lidos da rede são calculados como (o valor bruto) * multiplicador + aditivo. O inverso é aplicado quando um valor numérico é escrito na rede.

Figura 10: Configuração do *data point*

Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
LED_17	Binário		17	Bobina (Coil Status)	0
LED_27	Binário		27	Bobina (Coil Status)	0
LVDT_Angle_17	Numérico		17	Registrador holding	5
LVDT_Angle_27	Numérico		27	Registrador holding	5
Speed	Numérico		17	Registrador holding	7
Angulo_desejado_17	Numérico		17	Registrador holding	6

Detalhes do data point	
Nome	LED_17
Export ID (XID)	DP_511625
Id do escravo	17
Faixa do registro	Bobina (Coil Status)
Tipo de dados modbus	Binário
Offset (baseado em 0)	0
Bit	0
Número de registradores	0
Codificação de caracteres	ASCII
Configurável	<input checked="" type="checkbox"/>
Multiplicador	1
Aditivo	0

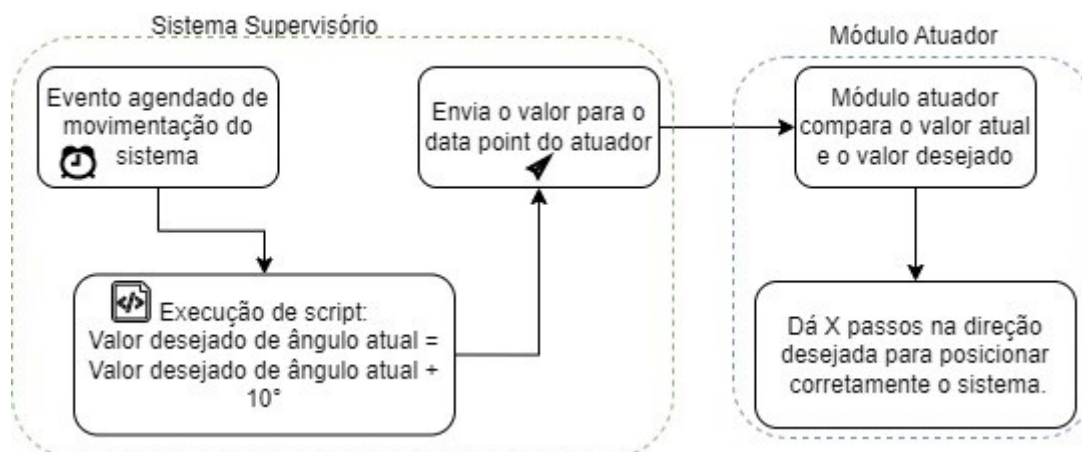
Fonte: Autoria própria (2022)

Foram criados *data points* para as bobinas que representam o estado dos LEDs dos escravos de ID 17 e 27. Foram também criados *data points* para o registrador que contém o ângulo atual do sistema medido a partir do LVDT no escravo de ID 27 e para os registradores que representarão o ângulo atual passado ao módulo atuador, que é o escravo de ID 17 na rede, o ângulo desejado e a velocidade de rotação do motor de passo do atuador.

Para realizar o envio ao módulo atuador dos dados que chegam ao sistema supervisorio vindos do módulo sensor, foi utilizado um *point link*, que tem como principal função atualizar o valor de um *data point*, baseado no valor de outro *data point*. Mantendo assim ambos os *data points* sincronizados, mesmo que ambos sejam de diferentes *data sources*, ou ainda de uma origem para múltiplos destinos

É necessário que o sistema assuma novas posições ao longo do dia sem que haja intervenção humana no processo, para tal, foi implementada uma rotina como a apresentada na Figura 11.

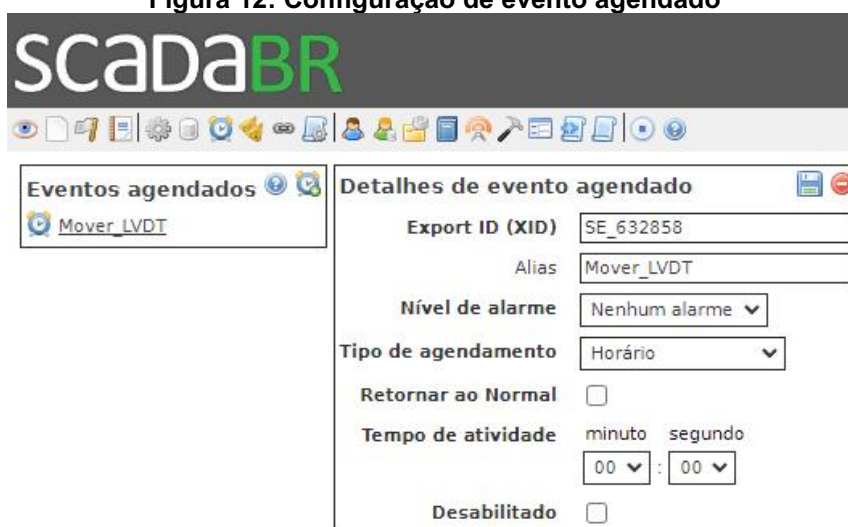
Figura 11: Diagrama de funcionamento de evento de movimentação dos espelhos



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a criação de uma intervenção periódica no sistema em um momento definido de tempo, foi feito o uso de um evento agendado. Isso permite associar uma ação do sistema a um horário definido, ou então, a um intervalo de tempo definido, independente dos valores presentes nos *data points*. Algumas opções são as de gerar e repetir estes eventos de hora em hora, semanalmente, mensalmente, anualmente ou até mesmo por meio de “*cron patterns*” (padrão cronológico) como por exemplo, eventos que devem ocorrer duas vezes ao dia. Sendo assim, foi criado um evento responsável por alterar o ângulo de inclinação do sistema de hora em hora, fazendo o sistema assumir novas posições ao longo do dia, para um melhor proveito da energia solar, as configurações deste evento podem ser observadas na Figura 12. Para aplicações reais do sistema, é recomendado que se aumente a frequência em que o *setpoint* é alterado, a fim de ter um melhor uso da resolução do sistema e maior eficiência energética.

Figura 12: Configuração de evento agendado



Fonte: Autoria própria (2022)

Somente a criação do evento não é o suficiente para garantir que o sistema seja colocado em uma nova posição de tempos em tempos. É necessário também a configuração de um tratador de evento, ou seja, uma ação a ser tomada caso um evento aconteça. Por meio dos tratadores de eventos é que se criam as ações a serem tomadas pelo sistema. Na versão 1.2 do ScadaBr, essas ações podem ser enviar uma notificação por e-mail, iniciar um processo, executar um *script* ou então escrever um valor em um *data point*, podendo este ser estático ou então um valor vindo de outro data point. Essas configurações podem ser vistas na Figura 13.

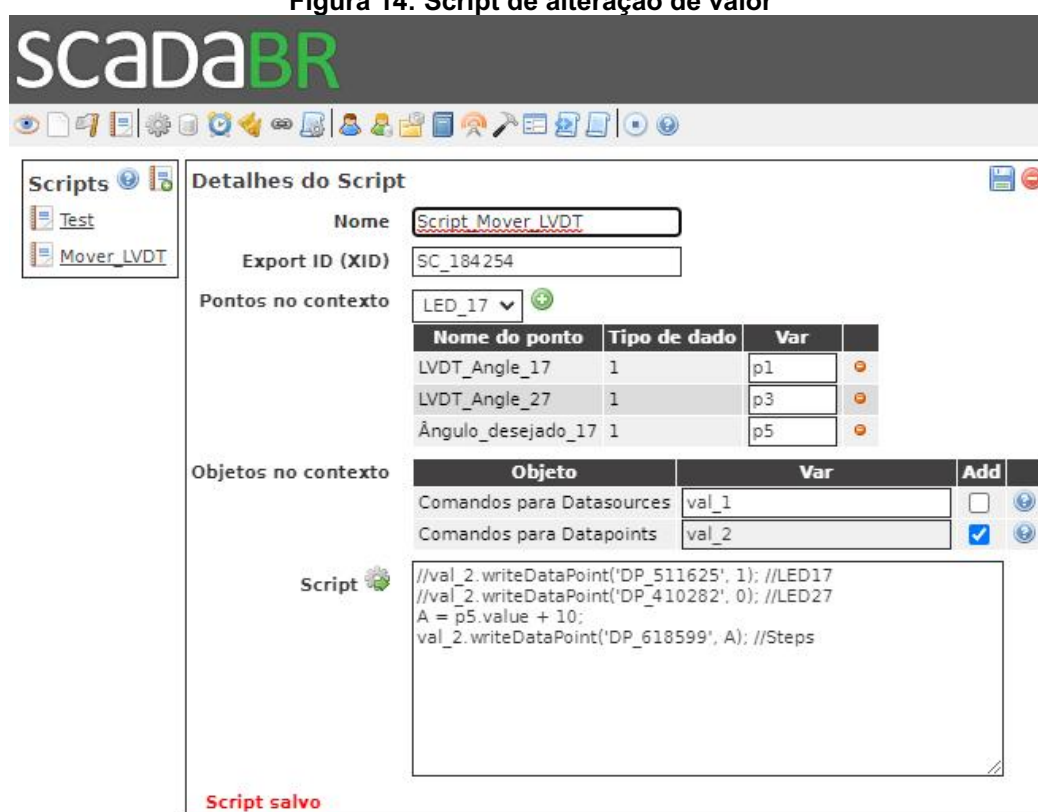
Figura 13: Configuração de tratador de evento



Fonte: Autoria própria (2022)

Deseja-se que a resposta do sistema ao evento agendado de alteração no ângulo do sistema seja uma simples adição de ângulo ao valor de ângulo atual desejado. Dessa forma, o sistema deve ser iniciado com um ângulo X e então incrementar este, até que ao fim do dia, o sistema seja colocado em uma posição de repouso para a proteção dos espelhos. Optou-se por fazer isso por meio de um *script*. Portanto, assim que o evento agendado seja disparado, o sistema supervisorio executará o *script*, mostrado na Figura 14, responsável por ler o valor desejado atual do ângulo do sistema, adicionar 10° a este valor e enviá-lo ao *data point* do módulo atuador, que então reposicionará o sistema.

Figura 14: Script de alteração de valor



Fonte: Autoria própria (2022)

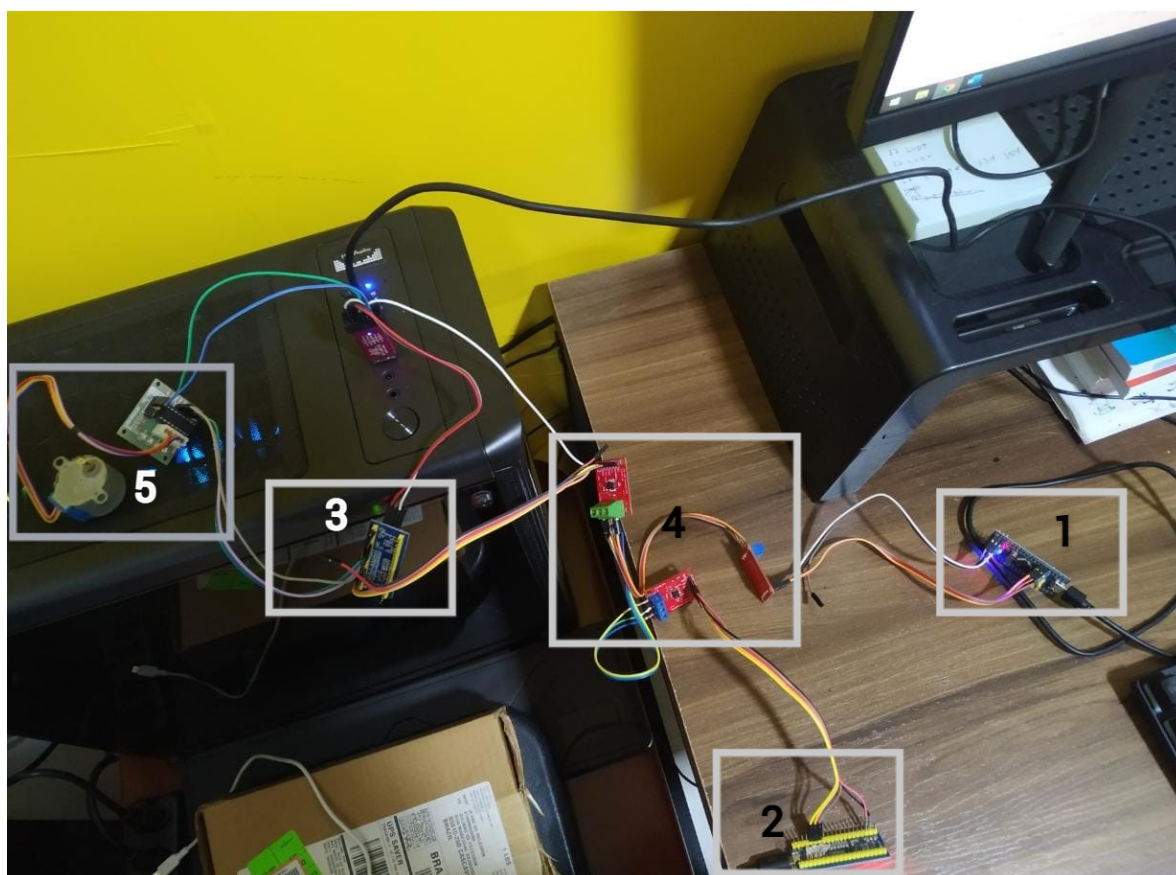
Para que o sistema seja de simples operação para os usuários, apresentando diretamente as informações do sistema e permitindo que elas sejam prontamente alteradas de maneiras simples e rápidas, foi elaborada uma interface gráfica fazendo uso das ferramentas que o ScadaBr traz para o desenvolvedor. A criação de interfaces gráficas e adição de elementos como botões, *data points* gráficos temporais das variáveis do sistema, entre outros, podem ser adicionadas a

uma página do ScadaBr, concentrando as informações e a operação do sistema a uma única página. Esta página do sistema permite não só a visualização de informações, mas também o controle de operação e verificação de histórico de funcionamento.

4 RESULTADOS

É possível visualizar a rede com cada um de seus nós desenvolvidos em operação na Figura 15. Conforme indicação numérica na figura, o elemento 1 é o conversor de camada física ligado à rede e ao computador pessoal. O dispositivo 2 é o terminal que simula o sensor ligado à rede, enquanto na indicação 3 tem-se o terminal do atuador, que é ligado à rede e ao driver do motor de passo indicado por 5. Por fim, tem-se os circuitos responsáveis por converter as interfaces de comunicação UART em RS-485 e interligar todos os terminais a rede MODBUS.

Figura 15: Rede MODBUS



Fonte: Autoria própria (2022)

A interface gráfica desenvolvida para o sistema supervisório, ilustrada na Figura 16, apresenta os dados da rede em tempo real e um gráfico do ângulo do sistema durante a última hora.

Figura 16: Interface gráfica ScadaBr

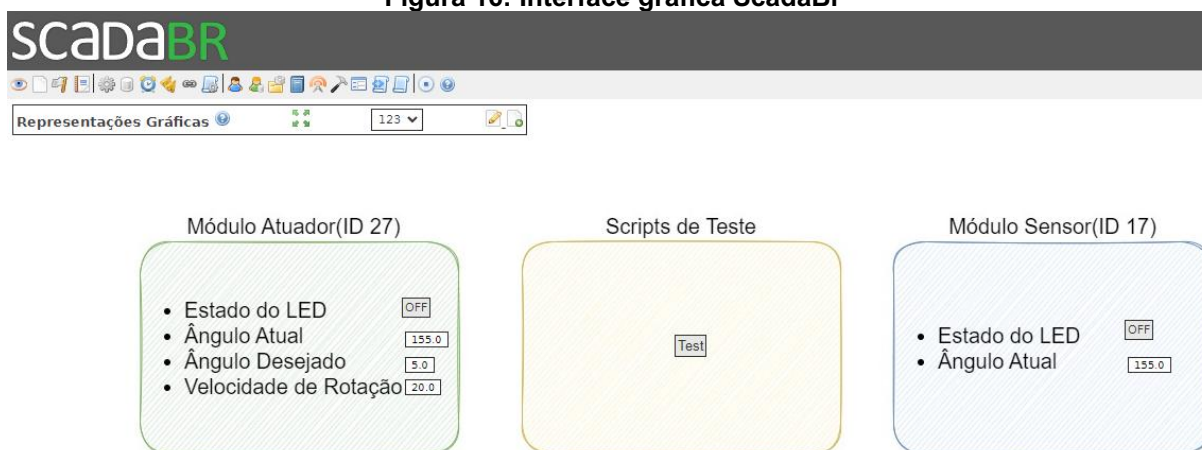
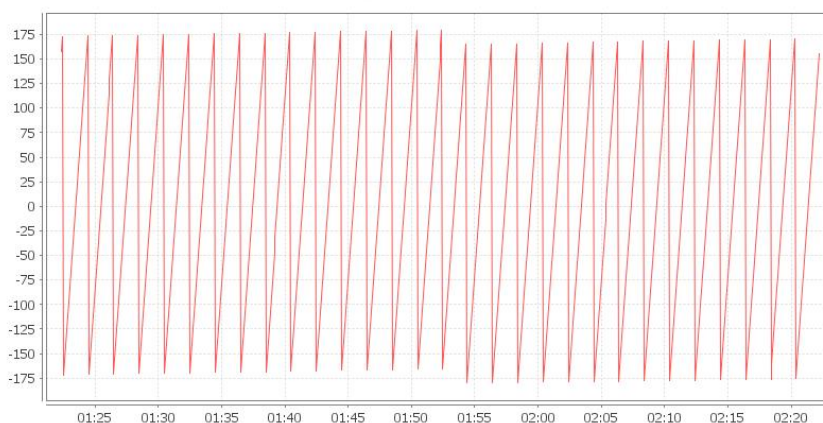


Gráfico de posição do sistema ao longo da última hora



Fonte: Autoria própria (2022)

Inicialmente, foi avaliado o funcionamento da rede MODBUS RTU somente entre os microcontroladores. Foram colocados diferentes valores estáticos nos registradores de cada um dos dois escravos e feitas requisições por intermédio de um terceiro microcontrolador na rede, que teve como função ser o mestre da rede durante o teste. A visualização dos dados deu-se mediante a ferramenta STM32CubeIDE, onde é possível visualizar expressões contidas na memória do microcontrolador em tempo real durante seu funcionamento, conforme mostra a Figura 17.

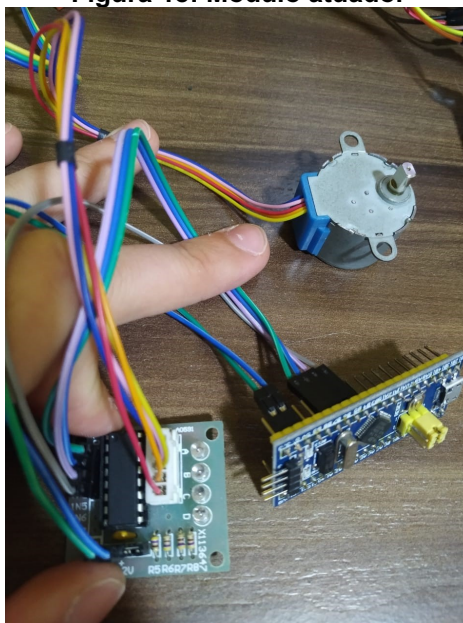
Figura 17: Leitura dos dados da rede MODBUS pelo STM32CubeIDE

Expression	Type	Value
Test_ModbusDATA_Slave17	uint16_t [8]	[8]
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[0]	uint16_t	23
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[1]	uint16_t	279
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[2]	uint16_t	535
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[3]	uint16_t	791
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[4]	uint16_t	1047
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[5]	uint16_t	1303
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[6]	uint16_t	1559
(x)= Test_ModbusDATA_Slave17[7]	uint16_t	1815
Test_ModbusDATA_Slave27	uint16_t [8]	[8]
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[0]	uint16_t	39
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[1]	uint16_t	295
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[2]	uint16_t	551
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[3]	uint16_t	807
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[4]	uint16_t	1063
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[5]	uint16_t	1319
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[6]	uint16_t	1575
(x)= Test_ModbusDATA_Slave27[7]	uint16_t	1831
+ Add new expression		

Fonte: Autoria própria (2022)

O motor de passo foi ligado ao microcontrolador, e então, foi testado seu funcionamento fora da rede. Alterando-se o valor do ângulo, diretamente na memória, por meio da interface de depuração do STM32CubeIDE. Na Figura 18, podemos ver o motor de passo conectado ao microcontrolador.

Figura 18: Módulo atuador



Fonte: Autoria própria (2022)

Durante os testes do motor de passo houve problemas com o acionamento das bobinas. Entretanto, foi possível observar o correto funcionamento do sistema por meio das sequências indicadas pelos LEDs.

Para testar o acesso à rede MODBUS a partir do computador pessoal foi utilizada uma ferramenta disponibilizada pela Schneider Electric, chamada de *Generic MODBUS/JBus Tester*, onde foram lidos os valores preestabelecidos em cada um dos módulos de escravos da rede. Essa ferramenta é uma ótima maneira de avaliar o funcionamento da rede, uma vez que traz dados também a respeito dos tempos de transmissão. É possível observar os dados lidos do escravo de ID 27 na Figura 19.

Figura 19: Generic MODBUS tester

Register Address	Value
400001	0
400002	0
400003	0
400004	0
400005	0
400006	65500
400007	0
400008	0

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir do funcionamento da rede, foi possível realizar alguns testes sobre a rede por meio do sistema supervisorio como, por exemplo, realizar operações específicas em nós específicos, como a leitura de registradores ou bobinas, apresentado na Figura 20.

Figura 20: Testes na rede MODBUS a partir do ScadaBr

The image displays three panels from the ScadaBr software interface:

- Pesquisa de nós modbus:** A search panel with a 'Pesquisar por nós' button, a 'Cancelar' button, and a scrollable list labeled 'Nós encontrados'.
- Leitura de dados Modbus:** A configuration panel for reading data. It includes fields for 'Id do escravo' (17), 'Faixa do registro' (Bobina (Coil Status)), 'Offset (baseado em 0)' (0), and 'Número de registradores' (1). A 'Ler dados' button is present. Below the fields, the text '0 ==> true' is displayed.
- Teste de localizador de ponto:** A configuration panel for point localization. It includes fields for 'Id do escravo' (27), 'Faixa do registro' (Registrador holding), 'Tipo de dados modbus' (Inteiro de 2 bytes com sinal), 'Offset (baseado em 0)' (5), 'Bit' (0), 'Número de registradores' (0), and 'Codificação de caracteres' (ASCII). It features 'Ler' and 'Adicionar ponto' buttons. At the bottom, the text 'Resultado: -139' is shown in red.

Fonte: Autoria própria (2022)

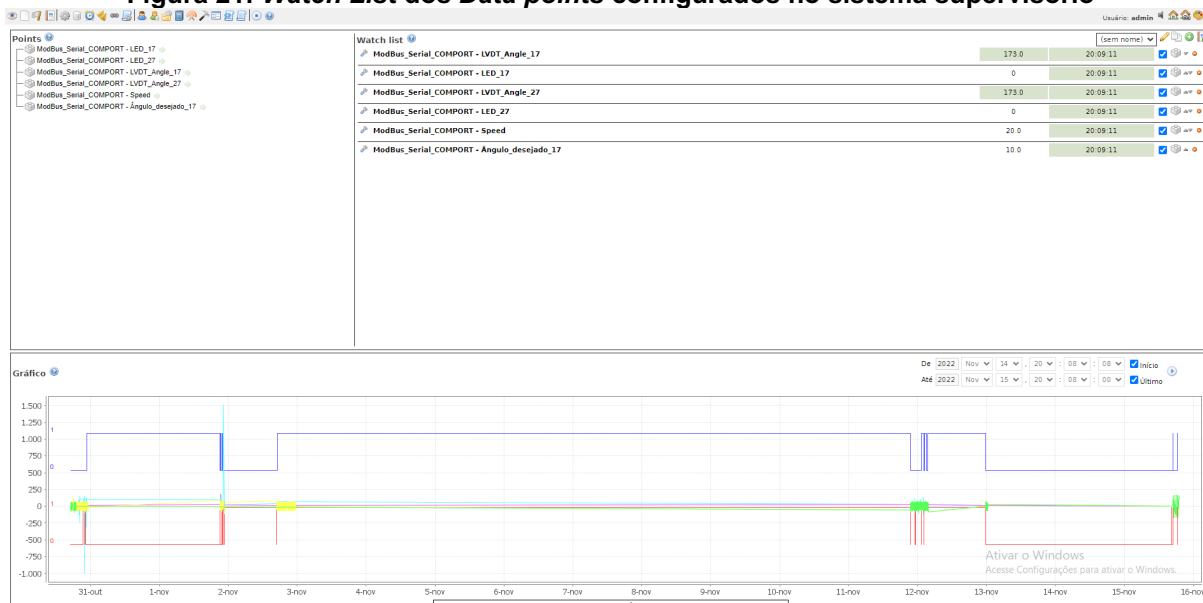
É possível observar a leitura em tempo real dos dados de cada um dos *data points* configurados por meio da *Watch List* apresentada na Figura 21.

Foi possível observar os valores dados pela simulação de ângulo dos espelhos, o ângulo que se deseja atingir através do movimento do motor de passo e a velocidade de rotação do sistema, além dos valores de saída das portas associadas aos LEDs de cada um dos escravos. Na parte inferior da imagem, é possível observar ainda o comportamento de cada uma das variáveis ao longo do último dia de operação.

Na interface gráfica do sistema supervisor vista na Figura 15, é possível controlar o estado dos LEDs dos módulos escravos da rede por meio do botão ON/OFF presente em cada uma das representações dos módulos. As alterações de

estado do LED observadas e indicam a transmissão dos dados por meio da rede montada neste trabalho. Ainda, pode-se observar o módulo atuador tentando alterar o ângulo do sistema a partir dos LEDs de indicação que são ligados junto as saídas do circuito de driver do motor de passo.

Figura 21: Watch List dos Data points configurados no sistema supervisório



Fonte: Autoria própria (2022)

Já na Figura 22, observamos os eventos de alteração no *setpoint* de ângulo do sistema, que ocorrem de hora em hora.

Figura 22: Eventos de alteração de ângulo.

The screenshot shows the ScadaBR 1.2 interface with a search for events. The search criteria include 'Mover_LVDI' and a date range from November 14, 2022, 7:36 PM to November 15, 2022, 7:36 PM. The results table shows a series of events occurring hourly, all with the message 'Evento agendado ativado: Mover_LVDI' and a status of 'Retornar ao Normal' desabilitado.

Id	Nível de alarme	Tempo	Mensagens	Tempo de inatividade	Reconhecido
1003	Normal	19:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	19:00:00
998	Normal	18:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	18:00:00
992	Normal	17:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	17:00:00
961	Normal	16:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	16:00:00
960	Normal	15:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	15:00:00
959	Normal	14:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	14:00:00
958	Normal	13:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	13:00:00
957	Normal	12:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	12:00:00
956	Normal	11:00:00	Evento agendado ativado: Mover_LVDI	Retornar ao Normal" desabilitado	11:00:00

Fonte: Autoria própria (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível monitorar um sensor de descolamento e controlar um motor de passo em bancada por meio de um sistema supervisório conectado à uma rede MODBUS. Afim de se desenvolver tal sistema, foi realizado um estudo sobre diversas partes que compõem um sistema supervisório e sua rede de campo, explanando sobre algumas características de sistemas de controle e seus sensores e atuadores, sobre redes industriais e como são estruturados protocolos de padronização de comunicação entre diversos dispositivos e também a respeito de sistemas supervisórios, abordando os sistemas de campo e as principais funcionalidades presentes em sistemas supervisórios, além de uma breve análise de suas vantagens.

O objetivo principal deste trabalho de simular o funcionamento de um sistema de rastreador solar em bancada e controlá-lo a partir do sistema supervisório foi alcançado com ressalvas, uma vez que o sensoriamento de ângulo não funcionou como esperado. É de interesse do autor deste trabalho, seguir com o desenvolvimento deste sistema para que se alcance o resultado desejado.

Durante os testes do motor de passo, notou-se um problema com a alimentação do atuador, fazendo com que seus drivers não possuíssem corrente suficiente para mover o motor. Entretanto, foi possível observar o correto funcionamento do sistema por meio das sequências indicadas pelos LEDs.

A maneira como o conversor de camada física foi concebido gerou atrasos na comunicação entre o sistema supervisório e a rede MODBUS de até 30 ms, uma vez que era requisitada a remoção de 20 bytes do *Stream Buffer* por ciclo e em casos onde houvessem menos bytes do que o requisitado, a tarefa ficava bloqueada por 30 ms até se ter um *timeout* e a leitura retornar a quantidade de bytes lidos, entretanto, uma vez que o sistema de controle é lento e sem eventos que geram risco aos operadores do sistema, tal desvantagem se torna pouco relevante.

As leituras do sensor pela interface SPI retornaram valores fixos, mesmo com a variação de posição do LVDT, e tais valores, não apresentavam sentido lógico. A tarefa foi então modificada para uma simples alteração periódica de escrita no registrador, de maneira que se pudesse seguir com o desenvolvimento do trabalho.

Apesar de ser formado por estruturas mais simples em sua essência, o presente trabalho compreende habilidades de várias áreas do conhecimento da engenharia, como a automação industrial, sistemas de controle, sensores e sua instrumentação, programação de sistemas embarcados, eletrônica, entre outros. Sendo assim um desafio não por sua dificuldade, mas por sua complexidade.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a montagem do sistema de fato, com espelhos e concentradores solares, a implementação de terminais de medição para as grandezas de saída do sistema, como por exemplo a temperatura atingida nos coletores, estudos de diferentes métodos de controle de rastreadores solares e seus resultados práticos, uma vez que a implementação de um sistema supervisorio torna mais fácil a aquisição de dados e o monitoramento de diversas grandezas simultaneamente, além de concentrar esses dados e facilitar a visualização dessas informações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3. ed., Brasília, 2008.

ALBUQUERQUE, P. U. B. de; ALEXANDRIA, A. R. de. **Redes Industriais: Aplicações em sistemas digitais de controle distribuído: protocolos industriais, aplicações SCADA**. 2 ed. São Paulo: Ensino Profissional, 2009.

ANDÒ, B; ASCIA, A; BAGLIO, S. A Ferrofluidic Inclinator in the Resonant Configuration. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s.l.], v. 59, n. 3, mar 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA. **Produção e Vendas de Sistemas de Aquecimento Solar 2022**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://abrasol.org.br/wp-content/uploads/2022/05/Pesquisa-de-Producao-e-Vendas-de-2022-ano-base-2021.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO PROFIBUS BRASIL AMÉRICA LATINA. Descrição técnica PROFIBUS. 2012. Disponível em: https://www.profibus.org.br/images/arearestrita/PROFIBUS_DESC_TEC_2012.pdf. Acesso 10 nov 2022.

ASSUNÇÃO, F. N. O. **Controlador Fuzzy implementado em ScadaBr para o controle de pressão numa adutora de água em Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

BENYAKHLEF, S; *et al.* Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. **Renewable Energy**, [s.l.]. v. 89, p. 463 – 474, 2016.

CARDOZO, W. S. **Controle de Motores de Passo em Malha Fechada Aplicado a um Manipulador Robótico**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, B. M. de. **Transformador diferencial linear variável em rastreador solar para um sistema de energia solar concentrada do tipo refletor linear fresnel**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2017.

CARVALHO, B. M. de, *et al.* Correlação entre desvios angulares de seguidores solares e eficiência de conversão de energia em concentrador solar do tipo refletor linear de fresnel. **XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA2016**, 2016.

CHEN, J.; LI, L.; WANG, L. The Application of PROFIBUS Technology in the Fengchan River Project's Electronic Control System Reform. **2012 5th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems**. Tianjin, p. 130-133, 2012.

DIAS, R. P. F. **Transformador diferencial de variação linear: condicionamento de sinal e desmodulação síncrona**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional**. [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020.sp.pdf>. Acesso em: 15 out 2020.

GOELLNER, E. **Ferramenta computacional para acionamento de motores de passo aplicados ao projeto de equipamentos CNC**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Santa Maria, 2006.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. [s.l.], 2004.

JAHNO, P. H. S. **Implementação do protocolo MODBUS utilizando redes sem fio baseado no protocolo IEEE 802.15.4**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

JUNIOR, E. F. C.; SACOMANO, J. B.; NETO, M. M. ENERGIA SOLAR TÉRMICA: INOVAÇÃO EM AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Universidade Estadual Paulista -Campus de Tupa, v. 8, n. 3, p. 209, dec 2014.

KIATRONICS. **28BYJ-48 – 5V Stepper Motor**. Cherrywood, Tauranga, New Zealand, 20?. Disponível em: https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet_28BYJ-48.pdf. Acesso 13 nov 2022.

LEME, M. O.; TROJAN, F.; XAVIER, A. A. P.; FRANCISCO, A. C. Digital Energy Management for Houses and Small Industries Based on a Low-cost Hardware, **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 10, p. 4275-4278, out 2016.

MANCUZO, E. Utilização de um microcontrolador para acionar um motor de passo. 2018.

MORAES, C. CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

NEGREIROS, Igor Soares. **Desenvolvimento do sistema de rastreamento de um protótipo de concentrador solar fresnel linear**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2015.

NYCE, D. S. **Linear position sensors**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

OLIVEIRA, A. P. M. D. et al. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Universidade Federal de Vicosa, v. 4, n. 1, p. 0163–0169, mar 2018.

OTHMAN, H. F.; AJI, Y. R.; FAKHREDDIN, F. T.; AL-ALI, A. R. Controller Area Networks: Evolution and Applications, **2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies**, p. 3088-3093, Damascus, Syria, 2006.

PELEGRIN, J. de. **Desenvolvimento de transdutor LVDT e módulo de instrumentação para ajuste da posição de refletores em rastreadores solares**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

PEREIRA, L. A. J. P. S. R. SISTEMAS SUPERVISÓRIOS. **Nova odessa, network Technologies**, 2003.

PRINSLOO, G.J.; DOBSON, R.T. **Solar Tracking**: High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates & sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware. Stellenbosch: SolarBooks, 2015.

QINGLEI, G; HUAWEI, L; SHIFU, M; JIAN, H. Design of a Plane Inclinator Based on MEMS Accelerometer. **International Conference on Information Acquisition**, 9-11 jul 2007, Jeju City, Coreia, 2007.

RELLA, R. **Energia solar fotovoltaica no brasil**. 2017. ISSN 2594-7931.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SCADABR. **Manual do Software**. 2010.

SHARMA, A.; AIRAN, S.; SHAH, D. Designing C Library for MODBUS-RTU to CANBUS and MODBUS-TCP IOT Converters, **2021 2nd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)**, Coimbatore, Índia, p. 731-737, 2021.

SILVA, F. R. M. da. **Implantação e Desenvolvimento de uma Rede de Automação Industrial e Sistema SCADA para Estação de Tratamento de Água Purificada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017

SILVA, M. R.; OLIVEIRA, A. R. de; CARMO, M. J.; ARAÚJO JUNIOR, L. O. de. Importância da ferramenta ScadaBr para o ensino em engenharia. **XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)**, Gramado, Rio Grande do Sul, 2013.

SORIA, R. A. P. **Cenários de Geração de Eletricidade a partir de Geradores Heliotérmicos no Brasil: A Influência do Armazenamento de Calor e da Hibridização.** Dissertação (mestrado) - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

STMicroelectronics. **Integrated Development Environment for STM32.** Online. 20?. Disponível em: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>. Acesso 13 nov 2022.

STMicroelectronics. **STM32F103x8 and STM32F103xB datasheet - production data.** 2022. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf>. Acesso 13 nov 2022.

TAMBOLI, S; RAWALE, M; THORAIET, R; AGASHE, S. Implementation of MODBUS RTU and MODBUS TCP Communication using Siemens S7-1200 PLC for Batch Process. **2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)**, Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala R&D Institute of Science and Technology, Chennai, T.N., India. p.258-263. 6 - 8 May 2015.

TAPIA, David Sánchez. **Estudio técnico y económico de una instalación solar con colectores lineales fresnel.** Proyecto Final de Carrera – Universidad Zaragoza, [s.l.], 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. **PGA970 LVDT Sensor Signal Conditioner**, Texas Instruments Inc. Dallas, Texas, USA, 2019. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga970.pdf?ts=1617301382220&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FPGA970.

TEXAS INSTRUMENTS. **Ratiometric measurements in the context of LVDT-sensor signal conditioning.** [s.l.], 2016. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slyt680/slyt680.pdf>.

TEXAS INSTRUMENTS. **THVD1520 10 Mbps RS-485 Transceiver With ±8-kV IEC ESD Protection**, Texas Instruments Inc. Dallas, Texas, USA, oct 2019. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/thvd1520.pdf?ts=1668309978906&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTHVD1520. Acesso 13 nov 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. **ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays**, Texas Instruments Inc. Dallas, Texas, USA, dec 1976 revised jul 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf>. Acesso 13 nov 2022.

WALKER, G. S. **Development of a low cost linear fresnel solar concentrator.** Dissertação (Mestrado) — Stellenbosch University, 2013.

YUE, G. Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on MODBUS, **2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP)**, Chengdu, China, p. 149-153, 2020.

ZHOU, Y.; YU, L.; LIU, M.; LI, X. 4G Client Remotely Monitors the Equipment of Profibus-DP Field Bus Based on Cloud Server and Android System. 2017 **3rd IEEE International Conference on Computer and Communications**, Chengdu, p. 2654-2658, 2017.